

علمی _ پژوهشی

مطالعه تجربی فرایند تأثیر گذاری پلاسما بر مشخصات عملکردی

شعله‌های ایستا و متحرک

امیر گودرزی^۱ اصغر افشاری^{۲*} 

دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸؛ تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۰۳)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223278.1402.12.1.7.6>

چکیده

بهبود فرایند احتراق از دیرباز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فرایندهای دخیل در تولید انرژی مورد نیاز انواع سیستم‌ها مورد توجه بوده است. استفاده از ابزار پلاسمایی به‌عنوان راهکار نوین برای افزایش بازده و ایجاد قابلیت عملکرد سیستم‌های اشتعالی در شرایط کاری وسیع‌تر در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق تأثیرات سیستم پلاسما پایه بر مشخصه‌های عملکردی فرایند احتراق به‌صورت تجربی بررسی شده است. برای این منظور از دو پیکربندی آزمایشگاهی استفاده شده است. در ساختار اول از مشعل بونزن به دو صورت باز و محصور برای مطالعه خواص شعله ساکن پیش‌آمیخته استفاده شده است. در این ساختار تحلیل نتایج بر اساس تصویربرداری اپتیکی به روش شیلرن و مشاهده پایداری و مخروط شعله تشکیل شده صورت گرفته است. در ساختار دوم از محفظه حجم ثابت برای مطالعه خواص شعله متحرک در محیط اشتعال پذیر استفاده شده است. در این مطالعه تفسیر نتایج بر اساس تصویربرداری فوق‌سریع به روش شیلرن از شعله شکل گرفته درون محفظه و همچنین داده‌های فشار درون محفظه حین احتراق استفاده شده است. نتایج گویای بهبود مشخصات شعله شامل سرعت آرام شعله و پایداری آن بر اساس مشاهدات شعله باز می‌باشد. همچنین کاهش زمان توسعه اولیه شعله و افزایش ناحیه اشتعال پذیری مخلوط تحت تأثیر محیط پلاسمایی، از نتایج حاصل از تست محفظه حجم بسته می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: احتراق، پلاسما، مطالعه آزمایشگاهی، روش‌های اپتیکی، راکتور سد دی‌الکترونیک

Experimental Study of Plasma Effects on the Stagnated and Propagating Flames Properties

Goudarzi, A.¹ Afshari, A.^{2*} 

University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 2023/03/09, Revised: 2023/07/16, Accepted: 2023/07/30, Published: 2024/08/25)

ABSTRACT

Combustion process improvement as one of the most important factors in the energy supplement for different devices has attracted great attention. Recently the concept of plasma assisted combustion as a new approach to increase efficiency and reliability of combustion based systems in the different working conditions has considered. In the present paper, two different experimental setups are used to investigate plasma system effects on the operational characteristics of combustion process. At the first setup, open and confined Bunsen burner is used to study premixed stagnated flame. In this structure flame properties are measured by optical schlieren photography method based on generation and stability of the flame cone. At the second setup, constant volume chamber is used to analyze propagating flame in combustible environment. In this structure high speed schlieren photography from propagating flame front and high frequency pressure measurement is used to study premixed propagating flame. Results indicate that, in the open stagnated flame plasma effects improve the laminar flame speed, in the confined stagnated flame plasma effects improve the flame stability and in the propagating flame plasma effects reduce the ignition delay, develop the lean flammability limit and increase laminar flame speed.

Keywords plasma assisted combustion, optical schlieren photography, experimental analysis, laminar flame speed, flame stability, flammability limit.

۱- دانشجوی دکتری: agoudarzi@ut.ac.ir

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): afsharia@ut.ac.ir

۱- مقدمه

انرژی پلاسمای تشکیل شده تبدیل به انرژی شیمیایی می-شود در حالی که در پلاسمای گرم بیشتر انرژی آزاد شده تبدیل به گرما می-شود. به عنوان نمونه ای از پلاسمای گرم می توان از مشعل پلازما و شمع های جرقه ای معمول نام برد و برای پلاسمای سرد می توان به تخلیه رشته ای کرونا، تخلیه میکروویو، تخلیه پالسی نانو ثانیه متوالی و تخلیه سد دی-الکترونیک اشاره کرد. شایان ذکر است که پلاسمای غیر تعادلی به توان کمتری برای تشکیل نسبت به پلاسمای تعادلی نیاز دارد. مزیت بهبود احتراق به واسطه برانگیختگی غیر تعادلی نسبت به بهبود حرارتی مقدار انرژی بسیار کمتر مورد نیاز می باشد [۴].

دسته بندی انواع تخلیه الکترونیکی تشکیل دهنده پلازما بر اساس دو عامل میدان الکترونیکی کاهش یافته $(E/N)^A$ و غلظت الکترون ها (ne) صورت می گیرد [۵، ۶]. برخی از انواع تخلیه مخلوطی از چندین گونه پلازما هستند و نواحی مختلف آنها بر اساس مقادیر مختلف میدان الکترونیکی کاهش یافته مشخص می گردد. تخلیه الکترونیکی از نوع قوس الکترونیکی در مقادیر نسبتاً پایین میدان الکترونیکی کاهش یافته تشکیل می شود. در این حالت مسیر اولیه آزادسازی انرژی، تحریک مد چرخشی گاز می باشد. تخلیه پایای میکروویو در فشار بالا از تعدادی رشته^۸ تشکیل می شود که یک پلاسمای نسبتاً داغ تعادلی می سازد. جرقه های پالسی^{۱۰} و قوس های لغزان^{۱۱} برخی از ویژگی های تخلیه های تابان^{۱۲} و قوس ها را در مراحل توسعه خود ترکیب می کنند. در این حالت مقدار میدان الکترونیکی کاهش یافته در بازه ۱۰۰-۱۰ می باشد. مقدار معمول برای تخلیه تابان DC نزدیک به حد شکست می باشد و سازوکار غالب جهت تحریک برانگیختگی مدهای ارتعاشی و الکترونی از طریق برخورد های الکترونی می باشد. تخلیه ستون نور^{۱۳} دارای مقادیر زیاد E/N در پیشانی موج یونیزاسیون در سر ستون نور (حدود ۵۰۰ Td) است در حالی که این مقدار در کانال ستون نور در بازه ۲۰-۳۰ Td می باشد. این گونه از تخلیه در حالتی که ولتاژ مازاد^{۱۴} (ولتاژ مازاد عبارت از میدان الکترونیکی می باشد که در

پلازما در یک تشریح ساده در واقع یک گاز الکترونیکی است که متشکل از مولکول های گاز خنثی، یون ها، اتم ها و مولکول ها و اتم های برانگیخته در مد الکترونی می باشد [۱]. اثرات پلازما می تواند منجر به افزایش دمای الکترون ها و یون ها و بهبود احتراق از طریق اثرات حرارتی، بهبود احتراق از طریق تشکیل اجزای فعال مانند رادیکال های آزاد و همچنین تجزیه مولکول های سوخت به اجزای سبک تر با قابلیت احتراق راحت تر گردد. از نتایج بهبود احتراق توسط پلازما می توان به افزایش سرعت کنده شدن^۳ در مخلوط پیش آمیخته، افزایش سرعت پرش^۴ و بلند شدن^۵ در جت شعله، گسترش محدوده اشتعال پذیری، افزایش نرخ واکنش ها و سرعت شعله، افزایش پایداری شعله و همچنین کاهش تأخیر اشتعال اشاره کرد [۲].

در حال حاضر دو گونه از پلازما در فرایندهای پلازما شیمیایی بکار گرفته می شوند که شامل پلاسمای تعادلی یا پلاسمای گرم^۶ و پلاسمای غیر تعادلی یا پلاسمای سرد^۷ می باشد. یکی از تفاوت های شاخص بین این دو گونه عبارت از این است که پلاسمای گرم بر اساس انرژی تقریباً برابر (دمای یکسان) الکترون، یون و اجزای خنثی تعریف می شود در حالی که پلاسمای سرد شامل الکترون های پرانرژی و یون ها و اجزای خنثی کم انرژی (معمولاً با دمای نزدیک به دمای محیط) می باشد. این موقعیت خاص معمولاً امکان دستیابی به مسیرهای پربازده تر برای انتقال انرژی الکترون های پرانرژی به فرایندهای شیمیایی مورد نظر (شامل تجزیه یا تحریک مولکول ها) بدون انتالپی زیاد (شامل گرم کردن و افت انرژی های مربوطه) را فراهم می کند [۳]. تفاوت عمده بین این دو گونه از پلازما درجه یونیزاسیون می باشد. به این ترتیب که پلاسمای گرم معمولاً به طور کامل یونیزه هستند در حالی که در پلاسمای سرد درجه یونیزاسیون (نسبت اجزای یونیزه شده به کل اجزا) پایین (10^{-5}) می باشد. در پلاسمای سرد بیشتر انرژی الکترون ها صرف تجزیه مولکول ها و ایجاد رادیکال ها می گردد و در نتیجه بیشتر

8 -Reduced electric field

9 -Filament

10 -Pulsed spark

11- Gliding arc

12 -Glow discharge

13- Streamer

14- Overvoltage

3 -Blow off

4 -Blow out

5 -Lift off

6 -Equilibrium or thermal or hot plasma

7 -Non-equilibrium or non-thermal plasma

پلاسما می تواند به سرعت سبب افزایش دمای مخلوط توسط انتقال انرژی از الکترون ها به مولکول های گاز شود و به این ترتیب نرخ واکنش های شیمیایی را بر اساس رابطه آرنیوس افزایش دهد. به علاوه گرم کردن گاز غیر همگن موجب اغتشاشات در جریان و شروع آشفستگی و اختلاط می گردد. مسیر دوم سینتیکی می باشد. پلاسما الکترون ها و یون های پر انرژی تولید می کند که در ادامه سبب تولید رادیکال های فعال (مانند O, OH و H) و متعاقباً موجب شتاب و تولید سازوکارهای آغاز و انشعاب زنجیره احتراق می گردند. این سازوکار از طریق تجزیه به واسطه برخورد مستقیم الکترونی، برخورد یونی و تجزیه به واسطه باز ترکیب (مانند O_2^+ و N_2^+) و تجزیه به واسطه برخورد واکنش دهنده ها با مولکول های برانگیخته الکترونیکی (مانند N_2^*) و $(O_2(a^1\Delta_g))$ و ارتعاشی (مانند $(N_2(v))$ اعمال می شود. همچنین پلاسما امکان تولید گونه های واکنش پذیر با طول عمر زیاد (مانند O_3) و کاتالیزهای میانی (مانند NO)، که زمینه ساز شتاب دهی به فرآیند اکسایش سوخت در دمای پایین هستند، را فراهم می کند. مسیر سوم تجزیه مستقیم سوخت از طریق برخورد با الکترون های پر انرژی می باشد. در این حالت مولکول های بزرگ سوخت به مولکول های کوچکتر شکسته می شوند و به این ترتیب واکنش پذیری سوخت و قابلیت پخش آن در مخلوط افزایش می یابد. مسیر چهارم بهبود فرآیند انتقال به واسطه طوفان یونی (القای جریان به واسطه نیروهای الکترواستاتیک در ابر یونی حاصل از تخلیه که پدیده ای الکترو هیدرودینامیک می باشد)، ناپایداری هیدرودینامیکی و حرکت جریان در اثر نیروهای کولومب و لورنز می باشد. به این ترتیب تغییر محلی سرعت جریان و افزایش آشفستگی و اختلاط در جریان به واسطه پلاسما حاصل می باشد. این سازوکارها به صورت توأمان و یا جداگانه می توانند منجر به کنترل بیشتر احتراق شوند که برای شعله های بسیار رقیق، احتراق در جریان با سرعت زیاد، احتراق در دما و فشار پایین، اشتعال مجدد در ارتفاع عملکردی زیاد، آغاز انفجار در موتورهای پالس انفجار و کنترل اشتعال در انواع موتورهای HCCI، PCCI و RCCI ضروری می باشند [۵، ۹].

اولین بررسی تجربی از تخلیه سد دی الکتریک در ۱۸۵۷ توسط ورنر فون زیمنس [۱۰] گزارش شده است. در این تحقیق زیمنس روی تولید اوزون تمرکز کرده است. او با عبور

مقایسه با حد شکست مقدار بیشتری داشته باشد) در نزدیکی الکترودها (۱/۲ تا ۲ برابر) وجود داشته باشد، می تواند تشکیل شود. تخلیه سد دی الکتریک سطحی^{۱۵} (SDBD) بر اساس مقادیر بیشتر میدان الکتریکی کاهش یافته به دلیل فاصله مؤثر کمتر بین الکترودها مشخص می شود. پالس های ولتاژ بالا با زمان برخواست بسیار کوتاه منجر به تشکیل موج های یونیزاسیون سریع^{۱۶} (FIW) می شود. برای یک زمان محدود (معمولاً از مقیاس نانو ثانیه برای چگالی تعداد گاز حدود 10^{18} cm^{-3} و زمان کمتر در چگالی های گاز بیشتر) می توان مقدار میدان الکتریکی کاهش یافته را نزدیک یا بیشتر از حد فرار^{۱۷} (برای هوا در حدود ۲kTd) نگه داشت. در این حالت الکترون های پر انرژی در ناحیه تخلیه تشکیل می شوند و یک پیش یونیزاسیون همگن و برانگیختگی گاز شکل می گیرد. در این حالت تخلیه مانند یک موج یونیزاسیون یکنواخت با سرعتی در حدود سرعت صوت محلی توسعه می یابد. توضیحات بیشتر مورد دسته بندی انواع تخلیه الکتریکی در مرجع [۷] آورده شده است.

پلاسما به عنوان حالت چهارم ماده ابعاد نوینی برای احتراق و کنترل آلاینده گی فراهم آورده است. این ابعاد شامل حرارت دهی و افزایش دمای سریع طبق اثر ژول (که بیانگر تولید حرارت در اثر عبور جریان الکتریکی از محیط رسانا می باشد)، انرژی الکترونی بالا ($10^6 - 10^7 \text{ eV}$)، عدم تعادل بالا در مدهای تحریک شده الکترونی و ارتعاشی و نیروهای کولومب و لورنز (که بیانگر تأثیر میدان الکتریکی و مغناطیسی بر حرکت ذرات باردار می باشد) است. اساساً شیمی پلاسما ویژگی های متفاوتی نسبت به شیمی احتراق برخوردار است. به این ترتیب که شیمی پلاسما در دمای پایین (۳۰۰ تا ۶۰۰ کلوین) طی ابعاد زمانی نانو تا میکرو ثانیه رخ می دهد در حالی که شیمی احتراق در دمای بالا (۱۲۰۰ تا ۲۰۰۰ کلوین) طی ابعاد زمانی ده میکرو تا میلی ثانیه رخ می دهد. به این ترتیب احتراق به کمک پلاسما^{۱۸} پلی جهت ارتباط بین فرایندهای سریع دما پایین پلاسما و فرایندهای کند دما بالای احتراق می باشد [۸].

پلاسما می تواند فرایندهای احتراق را از چند مسیر مختلف بهبود بخشد. مسیر اول حرارتی می باشد که در آن

15-Surface dielectric barrier discharge
16-Fast ionization wave
17-Runaway threshold
18-Plasma Assisted Combustion

حاضر بر پایه استفاده از کد یک بعدی PREMIX از مجموعه CHEMKIN [۱۷]، که شامل ۳۲۴ واکنش و ۵۴ جزء و ترکیبی از سازوکارهای GRI-Mech 3.0 و مجموعه‌ای از واکنش‌های ازن می‌باشد، صورت گرفته است. نتایج تحقیق گویای افزایش ۳ تا ۸ درصدی سرعت شعله در حضور ازن می‌باشد. البته این مقدار به صورت مطلق برای تمام نسبت‌های توازن یکسان است. از دیگر نتایج این تحقیق می‌توان به تغییر پروفیل اجزا و دمای شعله و همچنین تشکیل زودتر رادیکال‌ها و اتم‌ها در حضور ازن اشاره کرد. در این تحقیق تحلیل نتایج بر اساس نرخ تشکیل و مصرف اجزای میانی صورت گرفته است.

اومبرلو و همکارانش [۱۸] به صورت تجربی و عددی تأثیرات سینتیک و حرارتی ازن بر پیشروی شعله را در شعله آرام غیر پیش‌آمیخته مخلوط O_2 ، C_3H_8 و N_2 مورد بررسی قرار دادند. در این سیستم ازن توسط دستگاه DBD تولید و توسط اسپکتروسکوپی اندازه‌گیری شده است. در تحقیق حاضر شبیه‌سازی عددی توسط کد PREMIX با افزودن واکنش‌های ازن صورت گرفته است. نتایج آزمایش در فشار اتمسفریک گویای بهبود ۸ درصدی سرعت شعله آرام به ازای افزودن ۱۲۶۰ ppm ازن به مخلوط نیتروژن و اکسیژن می‌باشد. همچنین ارتفاع بلند شدن شعله با افزودن ازن کاهش می‌یابد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اثر سینتیک در بهبود پیشروی شعله توسط ازن، از طریق مهیا کردن ناحیه پیش‌گرم شعله جهت اکسایش زودتر سوخت، بیشتر از اثر حرارتی به واسطه انرژی ذخیره شده در ازن می‌باشد. همچنین بهبود سینتیک توسط ازن تغییرات هیدرودینامیکی در جبهه شعله ایجاد می‌کند و سبب بهبود بیشتر سرعت پیشروی شعله می‌گردد. بررسی عددی سینتیک شیمیایی واکنش‌ها گویای بیشترین تأثیرپذیری پدیده‌های مشاهده شده از واکنش‌های مربوط به تجزیه ازن و ترکیب اتم‌های اکسیژن حاصل با سوخت و ایجاد رادیکال‌های OH می‌باشد.

اومبرلو و همکارانش [۱۹] تأثیر $O_2(a^1\Delta_g)$ را بر پیشروی شعله آرام غیر پیش‌آمیخته C_2H_4 در فشار پایین (۳/۶۱ و ۶/۷۳ کیلو پاسکال) به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. دلیل در نظر گرفتن فشار پایین برای این مطالعه رابطه بین فشار و نتیجتاً چگالی تعداد با غلظت و

دادن هوا با گاز اکسیژن از فاصله میان دو استوانه هم مرکز از جنس شیشه این کار را انجام داد.

در دهه های بعد محققین بر روی تشکیل اوزون و اجزای N_xO_y مطالعاتی را انجام دادند. در آغاز قرن بیستم امیل واریورگ [۱۱] تحقیقات بسیار مهمی برای کنترل بهتر تخلیه گاز انجام داد. در ۱۹۲۰ اتو [۱۲] تولید کننده اوزون را صنعتی کرد. در ۱۹۳۰ باس [۱۳] کشف کرد که تجزیه هوا بین الکترودهای موازی مسطح که با دی‌الکترون پوشیده شده‌اند در تعداد زیادی از جریان‌های رشته‌ای کوتاه رخ می‌دهد. او اثر این تخلیه کوچک را روی صفحات حساس به دست آورد و توانست خواص ولتاژ و جریان را ضبط کند.

از سال ۱۹۹۱ به بعد ماسین و همکارانش [۱۴، ۱۵] کمک بزرگی به درک حالت تابش در تخلیه سد دی‌الکترون با فشار اتمسفریک نمودند و تخلیه گازهای هلیوم و نیتروژن را به صورت آزمایشگاهی و مدل سازی عددی ارائه کردند. با این کار گام بزرگی برای فهم بنیادی فرایندهای موجود در حالت تابش برداشته شد.

مرور مطالعات صورت گرفته در حوزه بهبود احتراق توسط پلازما گویای معطوف بودن حجم بیشتر این آثار به تحقیقات تجربی می‌باشد. زمینه این جهت‌گیری مربوط به پیچیدگی‌های مربوط به مدل‌سازی بر همکنش جریان واکنشی و فرایندهای پلازما می‌باشد. همچنین توسعه مدل مناسب در گرو وجود نتایج تجربی جهت شناخت کلی پدیده و اعتبارسنجی می‌باشد. غالب مقالات تجربی ارائه شده، جهت تفسیر نتایج از مدل‌های صفر بعدی و یک بعدی بهره جسته‌اند.

یکی از بزرگترین چالش‌ها در این حوزه عدم وجود دانش کامل نسبت به گونه‌ها و واکنش‌های مهم می‌باشد. به این ترتیب سیر مطالعاتی در زمینه تأثیر گونه‌های پلازما بر بهبود احتراق و توسعه مکانیزم‌های سینتیکی مولکول‌های برانگیخته مورد توجه قرار گرفت است. هالتر و همکارانش [۱۶] به منظور تعیین تأثیر اوزون بر سرعت آرام شعله مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا در دما و فشار محیط آزمایشاتی بر روی دستگاه چراغ بونزن^{۱۹} ترتیب دادند. در این سیستم ازن توسط دستگاه DBD جریان تزریق شده است و نتایج حاصل برای اعتبارسنجی مدل توسعه یافته مورد استفاده قرار گرفته است. مدل‌سازی احتراق در تحقیق

درجه چرخش کم توسط عبور ۶۰ درصد جریان از چرخاننده حلقوی خارجی و ۴۰ درصد جریان از صفحه سوراخدار داخلی و ترکیب آنها به دست آمده است. ایشان از سیستم PIV برای مشاهده میدان جریان استفاده کردند. همچنین میزان جذب میکروویو توسط شعله با آنالیز دما، نورتایی شیمیایی شعله و اندازه گیری CH_2O و OH توسط سیستم PLIF سنجیده شده است. نتایج این تحقیق برای دو رژیم انرژی میکروویو ارائه شده است. در رژیم انرژی زیاد، میکروویو سبب شکست الکتریکی در شعله می شود. در رژیم انرژی پایین شعله بزرگتر و پایدارتر می گردد و به نازل مشعل نزدیکتر می شود.

تحقیقات اخیر در زمینه توسعه جزئیات مدل سازی عددی، برای درک بهتر و کنترل بیشتر برای پدیده های تخلیه گذرای ناپایدار صورت گرفته است. این تحقیقات منجر به دانستن این موضوع شده که برای ایجاد تخلیه سد دی الکتریک در حالت پایدار و فشار اتمسفریک به شرایط عملکرد ویژه نیاز است که به صورت عمده توسط خواص گاز مورد استفاده تعیین می شود. از میان تحقیقات بعدی انجام شده می توان به مطالعه برای مدل سازی دو بعدی تخلیه سد دی الکتریک با سه گاز نئون، نیتروژن و اکسیژن توسط الیاسون و همکارانش [۲۲] اشاره کرد. بیشتر مطالعات مدل سازی، بر روی گازهای نجیب انجام می گیرد تا تخلیه پایداری رخ دهد. گولوبوسکی و همکارانش [۲۳] از مدل یک بعدی و با استفاده از چند ذره، روی مدل متفاوتی از عملکرد تخلیه گاز هلیوم در فشار اتمسفری مطالعه کردند.

از جنبه های مهم مدل سازی، در نظر گرفتن واکنش های شیمیایی پلاسما است. عملکرد شیمیایی پلاسما با در نظر گرفتن مکانیسم واکنش های بسیار پیچیده شامل مولکول و یا اتم های نیمه پایدار و ذرات چندگانه یون تغییر می کند و روی یونیزاسیون تأثیر می گذارد. ساده ترین مدل برای رفتار شیمیایی پلاسما در نظر گرفتن دو ذره الکترون و یون مثبت است. مدل سازی های زیادی بر این مبنا انجام شده است. از جمله می توان به پژوهش شین و راجا [۲۴] روی گاز هلیوم و همچنین نیشیدا [۲۵] روی گاز نیتروژن اشاره کرد. برای انجام مدل سازی بادقت بیشتر واکنش های شیمیایی پیچیده و ذرات بیشتری از جمله ذرات نیمه پایدار، خنثی، ذرات برانگیخته و یون های مثبت و منفی و غیره در نظر گرفته می شود. در این زمینه می توان به پژوهش های

طول عمر گونه های پلاسمایی می باشد. به این ترتیب که کاهش فشار منجر به افزایش مسیر پیمایش آزاد و کاهش فرکانس برخورد و افزایش طول عمر گونه های می شود. در تحقیق حاضر این جزء توسط تخلیه پلاسما میکروویو تولید شده و از اکسیژن اتمی و ازن توسط افزودن NO در زمان ماند جریان حدود یک ثانیه جداسازی شده است. نتایج تحقیق بیانگر بهبود ۲ تا ۳ درصد سرعت شعله به ازای افزودن ۵۵۰۰ ppm از $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$ می باشد. همچنین نتایج گویای تأثیر زیاد فرآیند خاموشی $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$ در اثر برخورد با مولکول های سوخت می باشد.

دو و همکارانش [۲۰] از تخلیه پلاسما پالس نانو ثانیه برای اشتعال و نگهداری شعله جت برخواستی مادون صوت و صوتی هیدروژن و یا اتیلن در جریان عرضی اکسیژن دما بالا با ماخ ۱/۷ تا ۲/۴ و در شرایط ترمودینامیکی مختلف استفاده کردند. در سیستم مورد استفاده برای تست پلاسمای غیر تعادلی توسط پالس های متوالی با ولتاژ بیشینه ۱۵kV، عرض پالس ۱۰ns و فرکانس ۵۰kHz تولید شده است. ساختار جریان و شوک به واسطه جت های سوخت و همچنین توزیع رادیکال های OH حاصل از احتراق به ترتیب توسط تصویربرداری شیلرن^{۲۱} و PLIF ثبت شده اند. نتایج تجربی شعله هیدروژن-اکسیژن به وسیله کد Cantera که مدلی صفر بعدی با فرض اختلاط آنی است و پالس پلاسما را به عنوان منبع تولید رادیکال در نظر می گیرد تفسیر شده است. در این کد از حلگر BOLSIG برای محاسبه EEDF بر اساس بیشینه میدان الکتریکی، چگالی تعداد و نسبت مولی گونه های استفاده شده است. تحقیق حاضر تنها برخوردهای الکترونی منجر به تجزیه مولکول های هیدروژن و اکسیژن را در نظر گرفته است. نتایج نشان می دهد وجود پلاسما سبب افزایش تولید رادیکال تا نسبت مولی هزار برابر در مقایسه با عدم وجود پلاسما و نتیجتاً اشتعال و پایداری شعله در پایین دست می گردد. همچنین وجود گونه های پلاسمایی سبب حفظ احتراق در فاصله بین پالس ها می شود. نتایج این تحقیق همچنین گویای بهبود بیشتر اشتعال در صورت قرار گرفتن کاتد پیش از آند می باشد.

اهن و همکارانش [۲۱] مطالعه آزمایشگاهی شعله آشفته پیش آمیخته متان-هوا با درجه چرخش کم را تحت تأثیر تشعشعات پیوسته میکروویو مورد توجه قرار دادند. جریان با

E/N و چگالی الکترونی طوری تعیین می‌شوند که در هر پالس انرژی منتقل شده به سیال برابر مقدار انرژی پالس در تست صورت گرفته باشد. به منظور پرهیز از پیچیدگی حل، شکل‌گیری پلازما در هر پالس برای یک محدوده کوچک مکعبی بین دو الکتروود و به صورت مجزا از حلگر LES شبیه-سازی شده و به جریان تزریق شده است. به این ترتیب تنها تأثیر سینتیک پلازما لحاظ شده است. نتایج این تحقیق گویای عدم تأثیرپذیری توسعه شعله از رادیکال‌های تولیدی پلازما به دلیل نسبت ممنوم بالای جت سوخت نسبت به اکسیژن عبوری می‌باشد.

وانگ [۳۳] در مقاله‌ای به بررسی عددی بهبود احتراق غیر پیش آمیخته آشفته متان-هوا توسط عملگر پالس متوالی پلازما بر اساس روش LES پرداخت. در این تحقیق اثرات پلازما روی جریان بر اساس مدل تک ممان و تنها با در نظر گرفتن اثرات هیدرودینامیکی و حرارتی در غالب عبارات منبع توسعه یافته است. به این ترتیب اثرات سینتیک و گونه‌های شیمیایی لحاظ نشده‌اند. در این تحقیق واکنش-های شیمیایی بر اساس فرض سرعت بالا در نظر گرفته شده-اند و شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار Fluent صورت گرفته است. نتایج عددی گویای تأثیر اغتشاشات آکوستیک ایجاد شده توسط عملگر پلازما بر بهبود واکنش‌های شیمیایی و نتیجتاً تغییر شکل شعله می‌باشد.

جمع‌بندی کلیات موضوع و مرور مقالات آورده شده گویای تأثیرگذاری پلازما بر عملکرد سیستم‌های احتراقی و قابلیت کاربردهای فراوان صنعتی این فناوری می‌باشد. از سوی دیگر این موضوع مفهومی نوین در راستای ارتقای سیستم‌های احتراقی می‌باشد. در تحقیق حاضر تأثیرات سیستم پلازما پایه بر مشخصه‌های عملکردی فرایند احتراق به صورت تجربی بررسی می‌شود. برای این منظور دو چیدمان آزمایشگاهی مورد توجه قرار می‌گیرد. در ساختار اول از مشعل بونزن به دو صورت باز و محصور برای مطالعه خواص شعله ساکن پیش آمیخته استفاده می‌شود. در این ساختار تحلیل نتایج بر اساس تصویربرداری اپتیکی به روش شیلرن و مشاهده پایداری و مخروط شعله تشکیل شده صورت می‌گیرد. در ساختار دوم از محفظه حجم ثابت برای مطالعه خواص شعله متحرک در محیط اشتعال پذیر استفاده می‌شود. در این مطالعه تفسیر نتایج بر اساس تصویربرداری فوق‌سریع به روش شیلرن از شعله شکل گرفته درون محفظه و همچنین

لین و همکارانش [۲۶] و همچنین هانگ و همکارانش [۲۷] اشاره کرد.

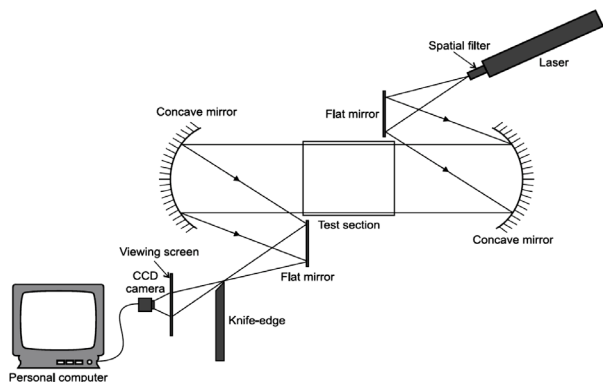
مرور مطالعات صورت گرفته در حوزه بهبود احتراق توسط پلازما بیانگر بدیع بودن تحقیقات مربوط به بررسی عددی چندبعدی فرایندهای مرتبط با این حوزه می‌باشد. در این مقاله به واسطه جنبه‌های نوین این موضوع خصوصاً در منابع فارسی و ایجاد پایه مناسب برای مطالعات بعدی مرور اهم مطالعات عددی نیز آورده شده است.

اهن و همکارانش [۲۸] به مطالعه تجربی و عددی تأثیر غلظت‌های مختلف ازن بر سرعت آرام و نرخ کرنش خاموشی شعله^{۲۲} پیش آمیخته رقیق متان-هوا آشفته با چرخش^{۲۳} کم پرداختند. مدل‌سازی سه بعدی توسط کد OpenFOAM [۲۹] و بر اساس روش LES-PaSR [۳۰] و سازوکار واکنش-های متان-هوا به انضمام واکنش‌های ازن صورت گرفته است. معیار سنجش بهبود بر اساس هیدروکسیل و فرالدید صورت گرفته است. نتایج تحقیق گویای همچنین افزایش سرعت آرام شعله و نرخ کرنش خاموشی به ترتیب به میزان ۱۰ و ۲۰ درصد به ازای ۰٫۵۷ درصد حجمی از ازن می‌باشد. افزایش نرخ کرنش خاموشی به معنای قابلیت شعله برای حضور در شرایط آشفته تر می‌باشد.

فربی و همکارانش [۳۱] بهبود احتراق پیش‌آمیخته متان-هوا با استفاده از پلازما می‌کروویو را در محفظه احتراق توربینی GELM6000 مورد بررسی قرار دادند. از نتایج این تحقیق می‌توان دریافت که پلازما تقریباً بر میدان جریان بی‌تأثیر است ولی شکل شعله و چین خوردگی‌های آن را تغییر می‌دهد. همچنین تشعشعات میکروویو سبب افزایش نرخ واکنش‌ها و آزادسازی حرارت می‌گردد و واکنش‌پذیری و سرعت آرام و آشفته شعله را افزایش می‌دهد.

ناگاراچا در رساله دکتری خود [۳۲] مدل‌سازی ابعادی پدیده مورد بررسی در مرجع [۲۱] را مورد نظر قرار داد. در این تحقیق مدل‌سازی پلازما بر اساس مدل تک ممان توسعه یافته و توسط عبارات منبع با معادلات حاکم بر جریان همبسته شده است. همچنین مدل‌سازی پلازما با فرض E/N و چگالی الکترونی یکنواخت و استفاده از حلگر BOLSIG برای محاسبه نرخ واکنش‌های الکترونی و در نظر گرفتن ۹ جزء و ۷۸ واکنش صورت گرفته است. مقادیر

محبوبترین روش اندازه گیری بر پایه شکست نور می باشد که دارای دو مزیت سادگی نصب تجهیزات و سهولت در تفسیر داده ها است. یک شماتیک از مجموعه آزمایش شیلرن که از آینه های مقعر استفاده می کند و به شکل حرف Z است در شکل ۱ نشان داده شده است. این سیستم شامل دو آینه مقعر، دو آینه تخت، یک منبع نور متمرکز (لیزر)، یک لبه تیز و یک دوربین مدار بسته است. خط مرکزی تمامی اجزا باید در یک راستا قرار داشته باشند. در صورتی که آینه ها دارای فاصله کانونی بزرگ تری باشند، حساسیت روش به تمرکز گرا دیان های دمایی افزایش خواهد یافت. نقش آینه اول این است که باریکه نور را به صورت موازی درآورد این در حالی است که آینه دوم نقش متمرکز کردن نور بر روی لبه تیز را بر عهده دارد. منبع نور در فاصله کانونی آینه اول و تیغه تیز در فاصله کانونی آینه دوم قرار خواهند گرفت. وظیفه تیغه تیز جذب بخشی از نوری است که به آن می رسد به طوری که در صورت عدم وجود هیچ گونه اغتشاشی در ناحیه تست، تصویر تشکیل شده بر روی پرده کاملا یکنواخت باشد.



شکل (۱): شماتیک چیدمان روش شیلرن [۳۴]

۲-۱- مشعل بونزن

در این بخش پیکربندی اندازه گیری مشخصات شعله ساکن با استفاده از مشعل بونزن مورد بررسی قرار می گیرد. این پیکربندی می تواند به صورت باز و یا محصور مورد استفاده قرار گیرد. همچنین از این پیکربندی می توان برای ایجاد شعله آرام و یا آشفته استفاده کرد. شعله ساکن با استفاده از یک مشعل شیلی و یا متقارن محوری که در آن سرعت مخلوط سوخت و هوای ورودی کاملا ثابت است قابل تولید می باشد. یک نمونه از مجموعه اندازه گیری سرعت آرام شعله با روش شعله ساکن شیلرن در شکل ۲ نشان داده شده است. ساده-

داده های فشار درون محفظه حین احتراق استفاده می شود. به این ترتیب از منظرهای متفاوت پارامترهای مشخصه متنوع سیستم های احتراقی تحت تأثیر سیستم های پلاسما پایه مورد بررسی قرار می گیرد. شایان ذکر است در این تحقیق آزمایش برای هر یک از شرایط کاری سه مرتبه تکرار شده است و نتیجه نهایی کمی مربوط به میانگین گیری همه تست ها می باشد.

۲- پیکربندی آزمایشگاهی و روش های مطالعه تجربی

پیکربندی های متنوع ای جهت مطالعه پارامترهای مشخصه شعله توسعه پیدا کرده اند. از پارامترهای مشخصه اساسی شعله می توان به سرعت آرام شعله، قابلیت اشتعال پذیری و تأخیر اشتعال اشاره کرد. همچنین مطالعه ساختار شعله و پایداری شعله از دیرباز مورد توجه بوده است. اندازه گیری مشخصات شعله و از مهم ترین آنها سرعت آرام شعله با استفاده از شیلرن به دو روش کلی انجام می پذیرد. روش اول که دقیق تر بوده و نیاز به تجهیزات بیشتری دارد، روش محفظه حجم ثابت و یا روش پیشروی شعله نامیده می شود. در این روش می توان فشار اولیه را بسته به استحکام محفظه احتراق و تجهیزات تأمین سوخت و هوای ورودی، تا مقادیر بسیار بالا افزایش داد و در نتیجه شرایط تست را به شرایط صنعتی نزدیک کرد. روش دوم که روش شعله ثابت و یا روش زاویه شعله نامیده می شود، سرعت آرام شعله را با استفاده از زاویه مخروط شعله و یا مساحت ناحیه واکنش در یک شعله دویعدی و یا متقارن محوری اندازه می گیرد. این روش تنها در فشار محل آزمایش قابل انجام بوده و دقت آن وابسته به دقت در به دست آوردن ناحیه واکنش است. دقت این روش ممکن است در مورد بعضی از گازها به اندازه روش پیشروی شعله باشد.

در این بخش سیستم ها و تجهیزات آزمایشگاهی مطالعه ساختار شعله و ایجاد محیط پلاسمایی به طور مجزا برای شعله ساکن با استفاده از مشعل بونزن و شعله پیش رونده با استفاده از محفظه احتراق حجم بسته مورد بررسی قرار می گیرد. از آنجاکه روش اساسی مطالعه تجربی در تحقیق حاضر تصویربرداری از شعله و شیلرن می باشد در این قسمت به تشریح این روش پرداخته می شود. اندازه گیری با روش شیلرن [۳۴] بر پایه شکست باریکه نور است. این روش

به این ترتیب رابطه (۱) حاصل می‌شود. در این رابطه زاویه α نصف زاویه مخروط شعله بوزن می‌باشد.

$$S_L = U_0 \sin \alpha \quad (1)$$

شایان ذکر است داشتن پروفیل سرعت خروجی تقریباً یکنواخت منجر به لبه نسبتاً تیزتر برای شعله می‌شود و اندازه‌گیری زاویه را با دقت بیشتری ممکن خواهد کرد. جهت یکنواخت نگه داشتن جریان در مقطع خروجی می‌توان از شبکه‌بندی کانال استفاده کرد. مهم‌ترین عارضه این روش جدای از اندازه‌گیری نادرست به دلیل اثر کشیدگی، عدم قطعیت زیاد حتی برای انحراف کوچک در خطوط جریان نزدیک شونده به شعله می‌باشد. همچنین تغییر پروفیل سرعت در خروجی تأثیر بسزایی بر شکل شعله خواهد داشت و به دلیل افزایش سرعت جریان در وسط مقطع مشعل، شعله بلندتر خواهد شد و این امر سبب کاهش دقت اندازه‌گیری زاویه مخروط شعله و بالتبع سرعت شعله بر مبنای زاویه مخروط شعله خواهد شد. در شرایط توسعه یافتگی جریان لازم است از روش مساحت شعله برای اندازه‌گیری سرعت شعله استفاده کرد. به این ترتیب با فرض یکسان بودن سرعت آرام شعله در تمام سطح شعله رابطه (۲) قابل حصول می‌باشد.

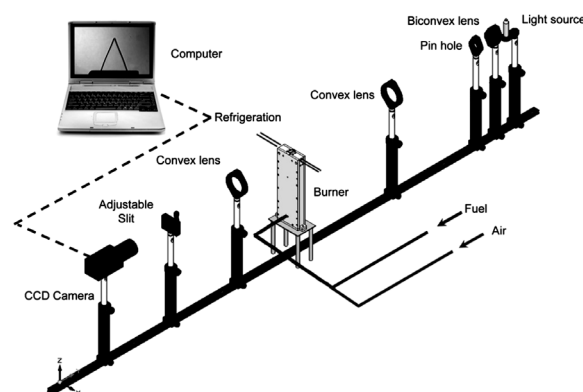
$$S_L = \frac{Q}{\rho_0 A} \quad (2)$$

از مشکلات عمده این روش می‌توان به وجود لبه‌های مختلفی با چگالی‌های متفاوت و قابل تمایز با روش‌های سنجش مختلف در جبهه شعله اشاره کرد. بدون شک بهترین سطح موردی است که دما شروع به انحراف از دمایی مخلوط نسوخته کرده است. متأسفانه این موقعیت به آسانی قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد و روش‌های پیشنهاد شده برای این امر منتج به نتایج متفاوت می‌گردد.

۲-۲- محفظه احتراق حجم بسته

در این بخش پیکربندی اندازه‌گیری مشخصات شعله پیش‌رونده با استفاده از محفظه حجم بسته مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روش مخلوط پیش‌آمیخته سوخت و هوا در یک محفظه احتراق حجم ثابت با استفاده از الکترودها محترق شده و از پیشروی شعله با روش شیلرن عکس‌برداری شده و داده‌هایی فشاری ثبت می‌گردد. توسط این‌گونه از مشعل می‌توان مشخصات شعله حاصل از سوخت و اکسیدکننده مشخص را برای شرایط کاری مختلف مانند

ترین راه اندازه‌گیری سرعت شعله استفاده از یک مشعل متقارن محوری است که در آن شکل جبهه شعله به صورت یک مخروط ساده در خواهد آمد. در این حالت با استفاده از زاویه مخروط یا مساحت شعله و همچنین با اطلاع از سرعت گازهای ورودی به محفظه احتراق، می‌توان سرعت شعله را با استفاده از قانون پیوستگی، نسبت چگالی گازهای نسوخت به سوخته و روابط هندسی محاسبه کرد. هرچند این روش ساده به نظر می‌آید، اما این روش مشکلاتی نیز دارد که توسط رالیز و گارفورث [۳۵] بیان گردیده‌اند. مهم‌ترین مشکل تعیین مکان دقیق لبه شعله است. هرچند که روش‌های زیادی برای این کار وجود دارد، نتایج آن‌ها با یکدیگر متفاوت است. نکته بسیار مهم دیگری که وجود دارد این است که سرعت سوختن در سراسر سطح مخروطی شکل جبهه شعله یکنواخت نیست که این خود به دلایلی چون غیریکنواخت بودن سطح شعله، انحنای آن و خاموش شدگی شعله در لبه مشعل به علت غیر آدیاباتیک بودن شعله است.



شکل (۲): نمای شماتیک چیدمان شناسایی مشخصات شعله ساکن با روش شیلرن

در یک مشعل بوزن پیش‌آمیخته اگر سرعت جریان خروجی بیشتر از سرعت آرام شعله مخلوط باشد یک شعله مخروطی در بالای نازل خروجی تشکیل می‌شود. سرعت جریان خروجی مخلوط نسوخته از دهانه مشعل را می‌توان به مؤلفه‌های مماسی و عمود بر سطح شعله تقسیم کرد. به دلیل انبساط حرارتی در جبهه شعله مؤلفه عمودی افزایش می‌یابد؛ ولی طبق رابطه زیر مقدار دبی جرمی گذرنده از سطح شعله ثابت باقی خواهد ماند. این در حالی است که سرعت مماسی از انبساط گاز تأثیر نمی‌پذیرد. از آنجاکه شعله ساکن می‌باشد، سرعت سوزش نسبت به مخلوط نسوخته باید برابر با مؤلفه عمود بر سطح شعله سرعت جریان نسوخته باشد.

با محاسبه معادله منطبق بر مقادیر آبی اندازه گیری شده شعاع شعله با روش حداقل مربعات خطا و برون یابی از این معادله تا حالت کشیدگی شعله صفر، می توان سرعت شعله آرام غیر کشیده شده را به دست آورد [۳۵].

در این روش بیشینه افزایش فشار در محفظه احتراق در حین داده برداری باید کمتر از ۲ درصد باشد که این امر در حالتی که پیشروی شعله کمتر از ۳۰ درصد حجم محفظه احتراق را دربر گرفته است اتفاق می افتد. در هنگام داده برداری، اطلاعات مربوط به چند فریم اول نیز که ممکن است تحت تأثیر انرژی حاصل از جرقه قرار گرفته است باید حذف گردد. نحوه محاسبه شعاع شعله به صورت تابعی از زمان و استخراج سرعت شعله فضایی غیر کشیده آرام $\frac{dR_f}{dt}$ از تحلیل عکس های شلرین توسط ماول و همکارانش [۳۸] به صورت کامل تبیین گردیده است.

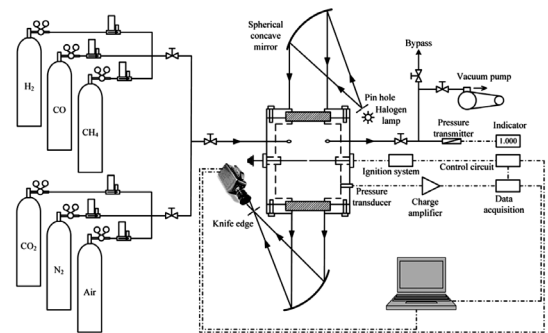
در محفظه احتراق حجم ثابت یکی از متداول ترین روش ها برای تعیین مشخصه های احتراقی ثبت داده های فشار در حین پیشروی شعله می باشد. در این روش توسط سنسورهای فشار با فرکانس داده برداری بالا مقادیر فشار درون محفظه هر لحظه ثبت می شود. نمونه ای از نمودار فشار درون محفظه در شرایط احتراقی در شکل (a) آورده شده است. بر اساس این نمودار، نمایشگر نرخ آزادسازی حرارت بر اساس رابطه (۵) محاسبه می شود. در نهایت نرخ آزادسازی حرارت جمعی بی بعد شده طبق رابطه (۶) به دست می آید.

$$RHRR = \frac{dP_{chamber}}{dt} \quad (5)$$

$$NCHR = \frac{\int_{t_0}^t RHRR dt}{\int_{t_0}^{t_{end}} RHRR dt} \quad (6)$$

از این نتایج برای مقایسه فرایند احتراق بین شرایط کاری مختلف استفاده می شود. زمان توسعه شعله (FDT) به عنوان دوره زمانی فرمان آغاز اشتعال تا رسیدن به ۱۰٪ مقدار کل NCHR تعریف می شود. زمان برخاست شعله (FRT) به عنوان دوره زمانی رسیدن از ۱۰٪ به ۹۰٪ مقدار کل NCHR تعریف می شود. شماتیک نمودار NCHR در شکل (b) ارائه شده است. T_{90} و T_{50} ، T_{10} در این شکل به ترتیب زمان رسیدن به ۱۰٪، ۵۰٪ و ۹۰٪ مقدار کل NCHR هستند. از تصاویر تطابق مراحل شکل گیری شعله و نمودار فشار احتراق بر حسب زمان می توان دریافت با پیشروی فرایند احتراق تا رسیدن به فشار بیشینه درون محفظه شدت نور تصاویر شعله افزایش پیدا می کند و پس از آن به دلیل تمام شدن مخلوط قابل اشتعال این شعله به تدریج مضمحل

نسبت توازن، فشار و دما به دست آورد. یک نمونه از مجموعه تست با استفاده از این روش در شکل ۳ نشان داده شده است. نحوه تست در این چیدمان به این صورت است که ابتدا محفظه توسط پمپ مکش خلأ می گردد. سپس با فرض وجود مخلوط گاز ایده آل، بر اساس مقدار فشار جزئی، ترکیب گازی پیش آمیخته مورد نظر در محفظه برای نسبت توازن و فشار اولیه مورد نظر ایجاد می شود. پس از ورود تمامی گازها به محفظه مدت زمان مشخصی برای یکنواخت شدن مخلوط گازها اختصاص داده می شود و سپس توسط جرقه الکتریکی این مخلوط اشتعال پذیر محترق می گردد. در نتیجه این عمل شعله تشکیل می شود و به صورت کروی و تا حد زیادی متقارن شروع به پیشروی درون محفظه می کند. برای اندازه گیری فشار در حین اجرای تست نیز از یک فشارسنج با قابلیت داده برداری بالا استفاده می شود.



شکل (۳): نمای شماتیک چیدمان اندازه گیری مشخصات شعله پیش رونده با استفاده از روش شلرین

برای محاسبه سرعت آرام سوختن از نتایج پیشروی کروی شعله، نیاز به اصلاحات به منظور جبران تأثیر اثر کشیدگی شعله وجود دارد. بر اساس آنالیز مجانبی [۳۶] اصلاح کشش سرعت سوختن در نواحی با کشش کم با استفاده از رابطه (۳) قابل بیان است. در این رابطه S_L سرعت آرام سوختن کشیده شده، S_L^0 سرعت آرام سوختن غیر کشیده (سرعت شعله آرام)، L طول مارکشتین و K نرخ کشیدگی شعله، $\frac{1}{A} \frac{dA}{dt}$ است. اندازه طول مارکشتین با ضخامت شعله هم مرتبه است [۳۷].

$$S_L = S_L^0 - LK \quad (3)$$

با در نظر گرفتن پیشروی کروی شعله نرخ تغییر شعاع این کره بر اساس رابطه (۴) قابل محاسبه است. در این رابطه σ نسبت انبساط گاز و C ثابت انتگرال می باشد.

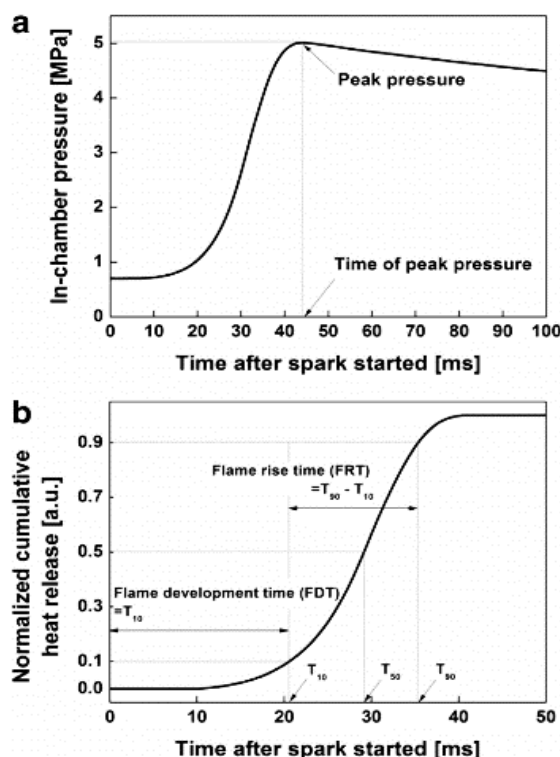
$$\sigma S_L^0 t = R_f + 2\sigma L (\ln(R_f)) + C \quad (4)$$

می‌شود که تنظیمات اپتیکی و ابزار دقیق اندازه‌گیری کمیت-های هدف به‌خوبی صورت‌گرفته باشد.

۱-۳- مشعل بونزن

شعله ساکن عبارت از شعله پایدار به همراه نوسانات محدود قرار گرفته در یک مکان مشخص می‌باشد. در مورد شعله ساکن از مشعل با مقطع دایروی برای مطالعات حاضر استفاده شده است. به‌این ترتیب دو کلاس شعله باز و شعله محصور مورد بررسی قرار گرفته است. در مورد مشعل باز محل تشکیل شعله خارج از لوله انتقال مخلوط قابل‌اشتعال قرار می‌گیرد؛ ولی در مورد حالت محصور شعله داخل لوله حاوی مخلوط قابل‌اشتعال قرار می‌گیرد. در واقع تفاوت اساسی این دو حالت اثرگذاری دیواره بر مشخصات شعله تشکیل شده می‌باشد. در این تحقیق برای شعله ساکن در مرحله اول، با استفاده از یک مشعل بونزن با مقطع دایروی شعله حاصل از احتراق سوخت گازی (متان و نرمال بوتان) و هوا که در محفظه اختلاط با هم پیش مخلوط شده‌اند تشکیل می‌شود و مشخصات اپتیک آن در اعداد رینولدز و نسبت‌های هم‌ارزی متفاوت به دست می‌آید. در مرحله دوم با اعمال محیط پلاسما بر مسیر ورودی مخلوط به برنر مشخصات شعله از طریق فرایندهای پیش‌گرمایش و تولید گونه‌های فعال تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد که میزان اثرگذاری این عامل با تغییر میزان دبی جریان عبوری و ولتاژ اعمالی تغییر خواهد کرد. در گام بعدی و پایانی سرعت سوزش آرام برای گاز با استفاده از روش شلرین بررسی می‌شود. سوخت گازی و هوا پس از عبور از روتامتر وارد محفظه مخلوط‌کننده می‌شوند. روتامتر برای هر گاز طوری کالیبره می‌گردد که محل قرارگیری آن در مقابل هر درجه بیانگر دبی حجمی لحظه‌ای سیال موردنظر باشد. همچنین برای اندازه‌گیری دما از ترموکوپل نوع K استفاده می‌شود. پس از آنکه مخلوط سوخت و هوا به طور کامل با هم ترکیب شدند، جریان حاصل از آنها وارد مشعل بونزن می‌گردد، به‌منظور یکنواختی و پخش شدن جریان در عبور از یک مقطع کوچک به یک مقطع بزرگ و حذف گردابه‌های احتمالی از ساچمه‌هایی به قطر ۲ میلی‌متر از جنس استیل استفاده شده است. در تحقیق حاضر برای شعله ساکن، ایجاد پلاسما از طریق اعمال اختلاف پتانسیل و فرکانس بالا بین دو الکترود با حدفاصل دی‌الکتریک در مسیر عبور جریان صورت می‌گیرد.

خواهد شد. قابل توجه این نکته است که پس از اتمام فرایند احتراق بسته به میزان انتقال حرارت به جداره محفظه و دمای محیط منحنی فشار به تدریج روند کاهشی را در پیش خواهد گرفت. به‌این ترتیب کاهش فشار بر اساس رابطه گازهای کامل و باتوجه به فرایند انتقال حرارت که بیشتر معطوف به نوع تشعشعی می‌باشد و کاهش دمای متناسب با آن قابل تحلیل است.



شکل (۴): دیاگرام شماتیک (a) فشار درون محفظه و (b) نرخ آزاد شدن حرارت تجمعی بی‌بعد شده [۱۶]

۳- بیان شرایط تست‌ها و ارائه نتایج

در این قسمت مشخصات سیستم‌های استفاده شده برای انجام آزمایش‌ها بیان شده است و در ادامه نتایج مربوط به هر تست آورده شده است. به‌این ترتیب ابتدا برای شعله ساکن و سپس برای شعله متحرک فرایند فوق‌الذکر به طور مجزای توضیح خواهد شد. شایان‌ذکر است تمامی تجهیزات بر روی میز اپتیکی با ابعاد $3 \times 1/5$ متر نصب شده‌اند. میز اپتیک بر روی چهارپایه پنوماتیکی قرار گرفته است. این پایه‌ها به هوای فشرده با فشار ۴ بار وصل شده‌اند. در واقع توسط این بالشتک‌های هوایی، میز اپتیک از ارتعاشات زمین ایزوله می‌گردد و افقی بودن میز نیز تأمین می‌گردد. جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های آزمایش زمانی به طور دقیق میسر

در مطالعه شعله ساکن از دوربین سونی مدل NEX-FS700UK AVCHD MTS با قابلیت تصویربرداری ۱۰۰۰ fps، پنل دیجیتال مدل Autronics MT4W-DA-4N، منبع تغذیه ولتاژ بالا مدل Afra Sanat، لیزر آرگون مدل Ion Laser Tech 5500A-00، اسیلوسکوپ، ترموکوپل PT100، میز اپتیک و ادوات اپتیکی مدل Melles Griot، کمپرسور هوا و سیلندرهاى گاز متان و بوتان استفاده شده است.

۱-۱-۳- شعله پیش آمیخته باز

در تحقیق حاضر شعله پیش آمیخته باز به عنوان شعله ای معرفی شده است که خارج از تیوب برنر تشکیل شده است و ساختار مخروطی دارد. به منظور بررسی تأثیر پلاسما بر ساختار شعله از پیکربندی سد دی الکتریک استفاده شده است. به این ترتیب برای کنترل مشخصات پلاسما از یک منبع ولتاژ بالا با فرکانس ثابت ۱۰ kHz و توان مصرفی قابل تغییر جهت اعمال مقادیر مختلف ولتاژ استفاده شده است. شایان ذکر است در محدوده ولتاژ اعمال شده پلاسمای تشکیل شده از نوع تخلیه استریم است که با پالس های جریان بسیار زیاد که با عنوان میکرو تخلیه شناخته شده و در زمان و مکان به طور تصادفی توزیع می گردند، مشخص می شوند. شدت ساختار پلاسمای استریم با افزایش توان پلاسما افزایش پیدا می کند و چگالی و شدت نور میکرو تخلیه ها در این حالت افزایش می یابد. تحلیل نتایج این بخش بر اساس ساختار شعله و میزان کشیدگی شعله در هر مورد آورده شده است. در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر حرارتی پلاسما به صورت مجزا، از تصویربرداری شعله در دمای جریان مشابه با افزایش دمای حاصل از فعال شدن پلاسما در توان کاری مشخص استفاده شده است. این شرایط توسط حرف T در تصاویر ارائه شده مشخص شده است. این در حالی است که نتایج مربوط به پلاسما فعال در هر توان با حرف P در تصاویر مشخص شده است. در ادامه اهم نتایج تست شعله پیش آمیخته باز ارائه شده است.

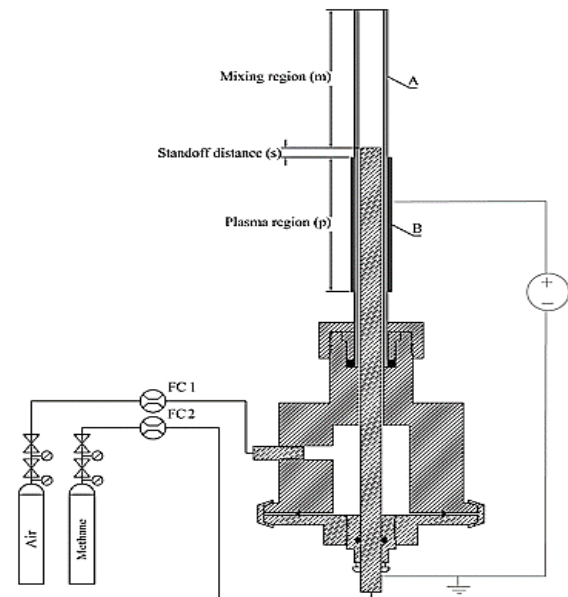
در جدول ۱ شعله پیش آمیخته باز متان برای رینولدز ۴۰۰، قطر الکتروود داخلی ۴ mm و نسبت توازن های ۱/۲ و ۱/۴ و برای مقادیر مختلف توان پلاسما آورده شده است.

جدول (۱): شعله پیش آمیخته باز متان برای الکتروود با قطر ۴ mm،

رینولدز ۴۰۰ و نسبت توازن های ۱/۲ و ۱/۴

Power(W)	$\phi = 1.4$	$\phi = 1.2$
----------	--------------	--------------

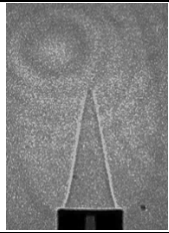
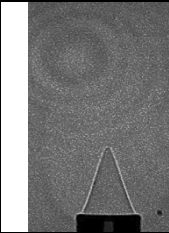
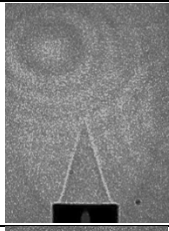
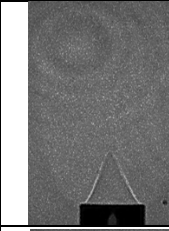
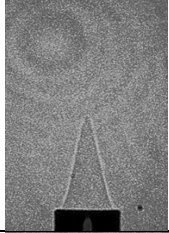
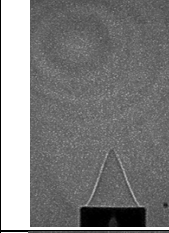
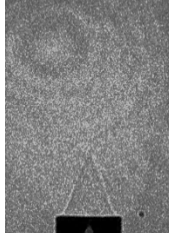
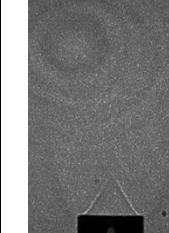
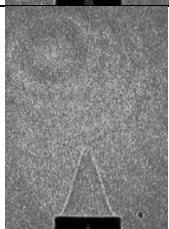
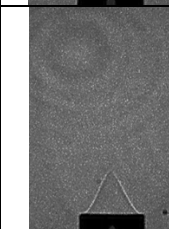
دو الکتروود مورد اشاره یکی به صورت میله فلزی داخل مسیر عبور جریان و دیگری به صورت نوار مسی پیچیده شده در اطراف لوله کوارتز به عنوان دی الکتریک ساخته می شود. به این ترتیب در مسیر عبور جریان محیط پلاسما تشکیل می شود و بر خواص ترموفیزیکی سیال اثر می گذارد. نمای شماتیک مشعل استفاده شده در این تحقیق برای مطالعه مشخصات شعله ساکن در شکل ۵ آورده شده است.



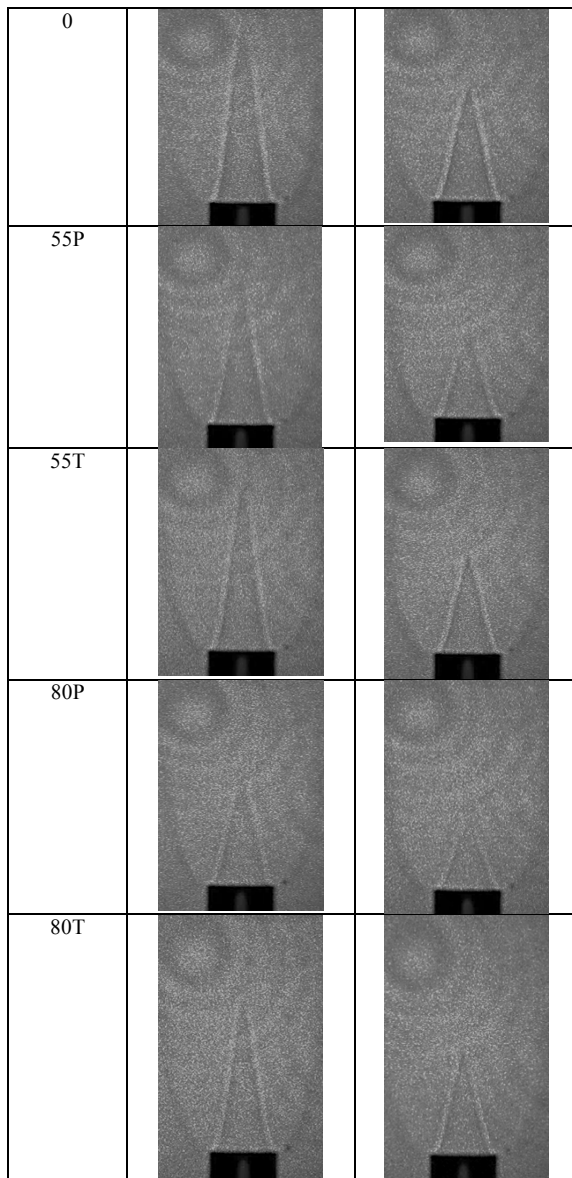
شکل (۵): شماتیک مشعل بونزن استفاده شده در آزمایش

مشخصات هندسی این مشعل به این صورت است که طول اختلاط محفظه احتراق ۱۰۰ mm بوده و قطر خارجی آن ۱۲ mm و قطر داخلی آن ۱۰ mm است. محفظه احتراق از جنس کوارتز است و حکم ماده دی الکتریک را دارد. در این هندسه از یک عملگر پلاسمای DBD استفاده شده است. در قسمت بیرونی محفظه احتراق الکتروود استوانه ای قرار گرفته است که از جنس مس می باشد و پهنای آن ۴۰ mm و فاصله انتهای این باند با انتهای الکتروود داخلی ۲ mm است. الکتروود داخلی در مرکز محفظه احتراق قرار دارد و از یک میله فولادی با قطرهای ۴ mm، ۶ mm و ۸ mm ساخته شده است. این مشعل به عنوان ابزار ایجاد شعله پیش آمیخته استفاده شده است و دو گونه شعله باز و محصور تحت تأثیر پلاسمای الکتریکی مورد مطالعه قرار گرفته است. به این ترتیب طیفی از شرایط کاری با توجه به تغییر مقدار عدد رینولدز و نسبت توازن مورد توجه قرار گرفته است.

کینتیک پلاسما، اندازه‌گیری دما در توان‌های مختلف صورت‌گرفته است و هربار تست در دو شرایط فعال بودن پلاسما و شرایط دمایی مشابه انجام گرفته است. در شکل ۶ منحنی تغییرات دما در خروجی مشعل بر حسب توان پلاسما برای الکترودهای با قطر ۴mm و ۸mm آورده شده است. همان‌طور که مشخص است الکتروده با قطر بیشتر سبب وجود گپ کوچکتر در ساختار DBD و تشکیل پلاسمای متراکم‌تر با توان کمتر می‌شود. همان‌طور که در جدول ۱ مشخص است اعمال پلاسما سبب افزایش زاویه مخروط شعله و کاهش ارتفاع آن می‌شود به این ترتیب سبب افزایش سرعت آرام شعله خواهد شد. همچنین مشاهده نتایج در افزایش دمای معادل شرایط پلاسمای فعال نشان می‌دهد که افزایش دما سبب افزایش سرعت شعله می‌شود که این امر در تطابق با نتایج مطالعات پیشین می‌باشد. نکته دارای اهمیت تأثیرگذاری بیشتر فعال‌سازی پلاسما نسبت به افزایش دما به میزان معادل آن می‌باشد. دلیل این امر وجود وجوه اثرگذاری دیگر پلاسما علاوه بر افزایش دما می‌باشد. از این جوانب می‌توان به اثرات آیرودینامیک و تغییر در پروفیل سرعت به واسطه وجود نیروهای هیدرودینامیکی لورنز اشاره کرد. همچنین میدان الکتریکی پلاسما سبب افزایش مسیرهای اکسیداسیون سوخت شده و باعث کاهش زمان شکسته شدن سوخت می‌شود. به این ترتیب پلاسمای فعال نسبت به افزایش دمای خالص علاوه بر افزایش دما سبب تغییرات کینتیک و هیدرودینامیکی در شعله می‌شود که مجموعاً به افزایش بیشتر سرعت شعله می‌انجامد. همچنین از این جدول مشخص است که افزایش توان پلاسما به دلیل افزایش ولتاژ پلاسما سبب تشدید اثرات پیش گفته می‌شود و نتیجتاً سرعت آرام شعله بیشتر افزایش خواهد یافت. از این جدول و با تحلیل نتایج می‌توان دریافت که اثرگذاری پلاسما بر نسبت توازن $1/4$ بیشتر از $1/2$ می‌باشد. دلیل این امر واکنش‌پذیری کمتر مخلوط با نسبت توازن $1/4$ نسبت به $1/2$ می‌باشد به این ترتیب فعال‌سازی پلاسما در این شرایط سبب اثرگذاری بیشتری بر مشخصات شعله خواهد شد. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که با فاصله گرفتن از محدوده نزدیک به شرایط استوکیومتری به سمت مخلوط‌های رقیق و غلیظ به دلیل دور شدن از شرایط ایده‌آل احتراق و سخت شدن فرایند احتراق اثرگذاری مکانیز بهبود احتراق پلاسما بیشتر خواهد شد. از نکات مهم دیگر در این جدول کاهش نرخ اثرگذاری پلاسما با افزایش توان آن می‌باشد. تحلیل کمی نتایج مربوط به جدول ۱ در جدول ۲ آورده شده است.

0		
55P		
55T		
80P		
80T		

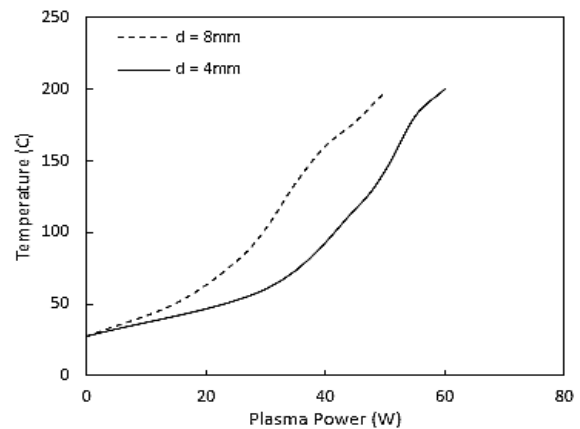
همان‌طور که مشخص است برای عدد رینولدز یکسان ارتفاع شعله برای نسبت توازن $1/4$ بیشتر از $1/2$ می‌باشد و همچنین این شعله از زاویه مخروط کمتری برخوردار است که بر اساس روش توضیح داده شده برای بررسی سرعت شعله، به معنای سرعت شعله بیشتر در نسبت توازن $1/2$ نسبت به $1/4$ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد سرعت آرام شعله با افزایش نسبت توازن از $1/2$ به $1/4$ به میزان ۳۵ درصد کاهش می‌یابد. این مشاهده در تطابق با نتایج عددی و مشاهدات تجربی پیشین می‌باشد که بیانگر صحت اندازه‌گیری انجام گرفته می‌باشد. در ادامه به منظور بررسی تأثیرات پلاسما بر مشخصات شعله پیش آمیخته باز از پیکربندی تشریح شده استفاده شده است. برای این منظور با تغییر توان پلاسمای اعمالی طیف متنوعی از کیفیت پلاسمای استریمر برای پیش فعال‌سازی مخلوط پیش آمیخته استفاده شده است. به منظور تفکیک تأثیر حرارتی و



جدول (۴): تحلیل کمی نتایج مربوط به جدول ۳ بر اساس درصد افزایش سرعت آرام شعله نسبت به حالت توان پلاسمای صفر

Power (W)	$\phi = 1.2$	$\phi = 1.4$
55 P	25.6	28.2
55 T	14.4	19.6
80 P	31.0	34.3
80 T	22.3	26.7

در جدول ۵ شعله پیش‌آمیخته باز بوتان برای رینولدز ۶۰۰، قطر الکتروود داخلی ۴mm و نسبت توازن‌های ۱/۲ و ۱/۴ و برای مقادیر مختلف توان پلاسما آورده شده است. همان‌طور که مشخص است برای عدد رینولدز یکسان ارتفاع شعله برای نسبت توازن ۱/۴ بیشتر از ۱/۲ می‌باشد و همچنین این شعله از زاویه مخروط کمتری برخوردار است که به معنای سرعت شعله بیشتر در نسبت توازن ۱/۲ نسبت به ۱/۴ می‌باشد. این مشاهده در تطابق با نتایج عددی و مشاهدات تجربی پیشین



شکل (۶): منحنی تغییرات دما بر حسب توان پلاسما در خروجی مشعل برای هوا با رینولدز ۲۰۰ و قطر الکتروودهای ۴mm و ۸mm

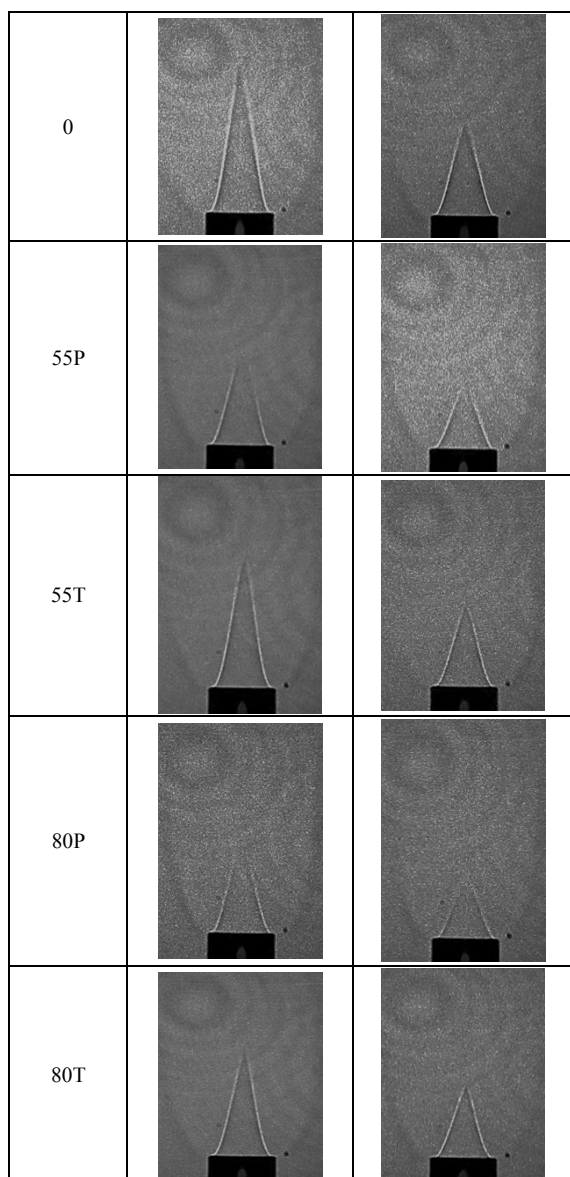
جدول (۲): تحلیل کمی نتایج مربوط به جدول ۱ بر اساس درصد افزایش سرعت آرام شعله نسبت به حالت توان پلاسمای صفر

Power (W)	$\phi = 1.2$	$\phi = 1.4$
55 P	27.2	30.5
55 T	20.4	23.2
80 P	35.1	38.9
80 T	29.6	33.4

در جدول ۳ شعله پیش‌آمیخته باز متان برای رینولدز ۶۰۰، قطر الکتروود داخلی ۴mm و نسبت توازن‌های ۱/۲ و ۱/۴ و برای مقادیر مختلف توان پلاسما آورده شده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش عدد رینولدز برای نسبت توازن ثابت، میزان زاویه مخروط کاهش یافته و ارتفاع شعله افزایش می‌یابد. البته این امر به معنای کاهش سرعت شعله نیست زیرا با افزایش سرعت جریان طبق روابط توضیح داده شده سرعت شعله با افزایش رینولدز جریان ثابت می‌ماند. نکته حائز اهمیت کاهش تأثیر پلاسما با توان ثابت بر سرعت شعله با افزایش عدد رینولدز می‌باشد. دلیل این امر کاهش زمان ماند برای تحت‌تأثیر پلاسما قرار گرفتن جریان مخلوط با افزایش عدد رینولدز می‌باشد. از نکات شایان توجه دیگر در این شکل اثرگذاری بیشتر پلاسما با توان کمتر نسبت به افزایش دمای متناظر با توان پلاسمای بیشتر است که نشان از تفوق اثرات کینتیک و هیدرودینامیک بر اثرات صرف حرارتی دارد. تحلیل کمی نتایج مربوط به جدول ۳ در جدول ۴ آورده شده است.

جدول (۳): شعله پیش‌آمیخته باز متان برای الکتروود با قطر ۴mm رینولدز ۶۰۰ و نسبت توازن‌های ۱/۲ و ۱/۴

Power(W)	$\phi = 1.4$	$\phi = 1.2$
----------	--------------	--------------



جدول (۶): تحلیل کمی نتایج مربوط به جدول ۵ بر اساس درصد افزایش سرعت آرام شعله نسبت به حالت توان پلاسمای صفر

Power (W)	$\phi = 1.2$	$\phi = 1.4$
60 P	28.4	31.4
60 T	18.3	19.7
80 P	35.1	37.2
80 T	24.6	26.6

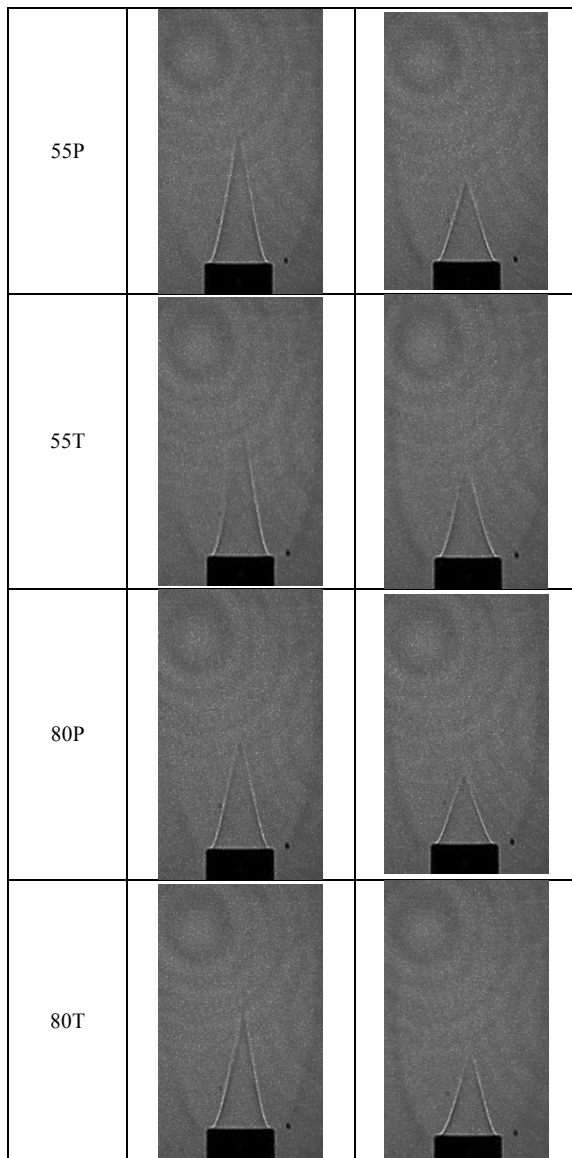
در جدول ۷ شعله پیش‌آمیخته باز بوتان برای رینولدز ۶۰۰، قطر الکتروود داخلی ۶mm و نسبت توازن‌های ۱/۲ و ۱/۴ و برای مقادیر مختلف توان پلاسمای آورده شده است.

همان‌طور که در این شکل مشخص است شعله مخلوط بوتان در شرایط عدم وجود پلاسمای ناپایدار می‌باشد و اصطلاحاً شعله تشکیل شده پرش دارد و زبانه می‌کشد. دلیل

می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۵ مشخص است اعمال پلاسمای سبب افزایش زاویه مخروط شعله و کاهش ارتفاع آن می‌شود به این ترتیب سبب افزایش سرعت آرام شعله خواهد شد. همچنین مشاهده نتایج در افزایش دمای معادل شرایط پلاسمای فعال نشان می‌دهد که افزایش دما سبب افزایش سرعت شعله می‌شود که این امر در تطابق با نتایج مطالعات پیشین می‌باشد. نکته دارای اهمیت تأثیرگذاری بیشتر فعال‌سازی پلاسمای نسبت به افزایش دما به میزان معادل آن می‌باشد. همچنین از این شکل مشخص است که افزایش توان پلاسمای به دلیل افزایش ولتاژ پلاسمای سبب تشدید اثرات پیش گفته می‌شود و نتیجتاً سرعت آرام شعله بیشتر افزایش خواهد یافت. از این شکل و با تحلیل نتایج می‌توان دریافت که اثرگذاری پلاسمای بر نسبت توازن ۱/۴ بیشتر از ۱/۲ می‌باشد. در مقایسه با جدول ۳ نکته شایان توجه اثرگذاری بیشتر پلاسمای فعال نسبت به افزایش دما در مواجهه با جریان پیش‌آمیخته سوخت بوتان می‌باشد. دلیل این امر بزرگتر بودن مولکول سوخت بوتان و مکانیزم پیچیده‌تر اکسیداسیون بوتان نسبت به متان می‌باشد. به این ترتیب فعال‌سازی جریان توسط پلاسمای و ایجاد اجزای فعال می‌تواند منجر به ایجاد مسیرهای جدید بیشتری برای تغییر مکانیزم پایه اکسایش بوتان شود و اثرگذاری بیشتری بر سرعت شعله آرام خواهد داشت. از نکات شایان توجه دیگر در این شکل اثرگذاری بیشتر پلاسمای با توان کمتر نسبت به افزایش دمای متناظر با توان پلاسمای بیشتر است که نشان از تفوق اثرات کینتیک و هیدرودینامیک بر اثرات صرف حرارتی دارد. اثر مذکور برای نسبت توازن‌های بالا مشهودتر است. همچنین این اثر برای مخلوط متان نیز مشاهده شده است ولی برای سوخت بوتان با شدت بیشتری نمایان شده است که این مسئله گواه دیگری بر اثرگذاری بیشتر کینتیک پلاسمای بر سوخت بوتان نسبت به سوخت متان می‌باشد. تحلیل کمی نتایج مربوط به جدول ۵ در جدول ۶ آورده شده است.

جدول (۵): شعله پیش‌آمیخته باز بوتان برای الکتروود با قطر ۴mm، رینولدز ۶۰۰ و نسبت توازن‌های ۱/۲ و ۱/۴

Power(W)	$\phi = 1.4$	$\phi = 1.2$
----------	--------------	--------------



استخراج می شود. به منظور بررسی تأثیر پلاسما بر ساختار شعله از پیکربندی سد دی الکتریک استفاده شده است. به این ترتیب برای کنترل مشخصات پلاسما از یک منبع ولتاژ بالا با فرکانس ثابت ۱۰ kHz و توان مصرفی قابل تغییر جهت اعمال مقادیر مختلف ولتاژ استفاده شده است. شایان ذکر است در محدوده ولتاژ اعمال شده پلاسما تشکیل شده از نوع تخلیه استریمر است که با پالس های جریان بسیار زیاد که با عنوان میکرو تخلیه شناخته شده و در زمان و مکان به طور تصادفی توزیع می گردند، مشخص می شوند. شدت ساختار پلاسما استریمر با افزایش توان پلاسما افزایش پیدا می کند و چگالی و شدت نور میکرو تخلیه ها در این حالت

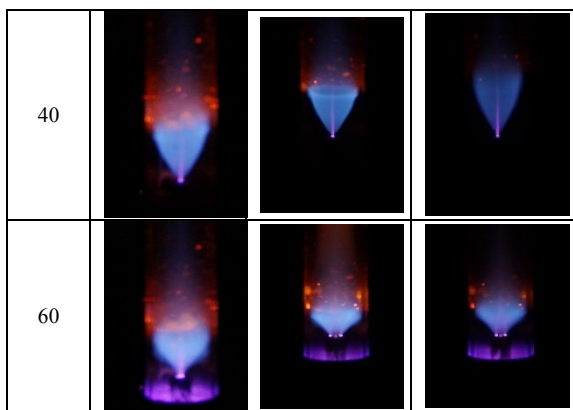
این امر کاهش سطح مقطع عبور جریان در پایین دست مشعل و ایجاد جریان غیریکنواخت در خروجی مشعل و تشکیل جت در مناطقی از خروجی می باشد. همان طور که در شکل مشخص است فعال سازی پلاسما منجر به پایدار شدن شعله می شود. دلیل این امر ترکیبی از اثرات حرارتی و کینتیک و هیدرودینامیکی می باشد به این ترتیب که در اثر وجود نیروهای هیدرودینامیکی از سوی پلاسما تأثیر عدم یکنواختی شکل گرفته در مقطع خروجی کاهش می یابد و پایداری شعله بالاتر می رود. از نکات دارای اهمیت در این شکل مواجهه با شعله ناپایدار در حالت دمای مخلوط افزایش یافته خصوصاً برای نسب توازن ۱/۴ می باشد. این پدیده با فعال سازی پلاسما به کلی مضمحل می شود که مجدداً گواهی بر اهمیت اثرات غیرحرارتی پلاسما بر شعله می باشد. مقایسه بین نتایج مربوط به الکتروود داخلی به قطر ۴mm و ۶mm به دلیل به وجود آمدن ناپایداری و تغییر اساسی جریان نمی تواند منجر به نتایج واضحی شود به همین دلیل مورد توجه قرار نگرفته است. به دلیل عدم پایداری شعله در جدول ۷ نتایج کمی برای این شکل ارائه نشده است.

۲-۱-۳- شعله پیش آمیخته محصور

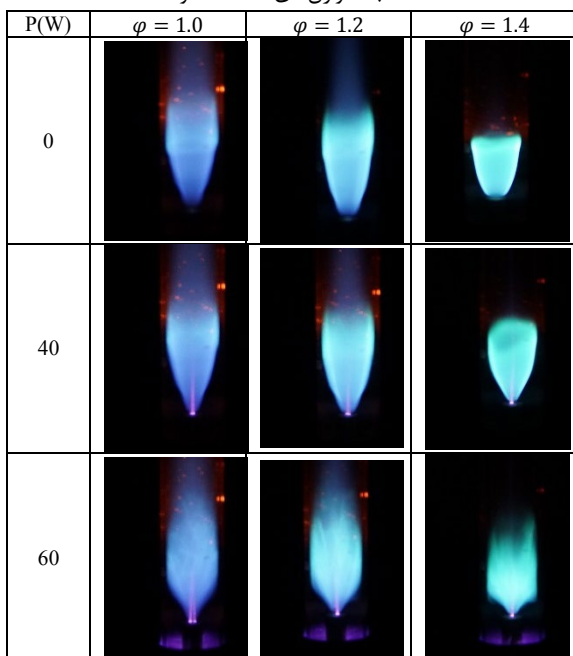
در تحقیق حاضر شعله پیش آمیخته محصور به عنوان شعله ای معرفی شده است که داخل تیوب مشعل تشکیل شده است و محصور به دیواره های تیوب می باشد و از آن متأثر می شود. مطالعه خواص این گونه از شعله ها توسط تصویربرداری مستقیم از شعله صورت می گیرد و با بررسی ساختار شعله، مشخصات آن در شرایط کاری مختلف

جدول (۷): شعله پیش آمیخته باز بوتان برای الکتروود با قطر ۶mm، رینولدز ۶۰۰ و نسبت توازن های ۱/۲ و ۱/۴

Power(W)	$\phi = 1.4$	$\phi = 1.2$
0		



جدول (۸): مشعل پیش‌آمیخته محصور بوتان برای رینولدز ۵۰۰ و نسبت توازن‌های ۱/۴، ۱/۲ و ۱/۰



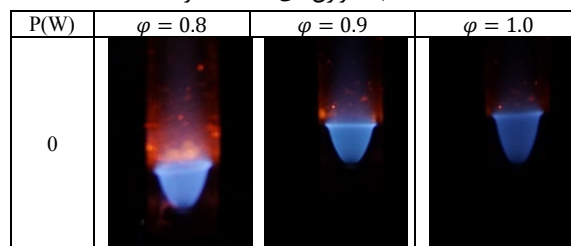
جدول ۹ در شعله پیش‌آمیخته محصور بوتان برای رینولدز ۵۰۰، قطر الکتروود داخلی ۴mm و نسبت توازن‌های ۱/۴، ۱/۲ و ۱/۰ برای مقادیر مختلف توان پلاسما آورده شده است. توضیحات ارائه شده برای جدول ۸ در مورد این

شکل نیز صادق است. با این تفاوت که در این قسمت به دلیل بالابودن رینولدز جریان شعله کشیده‌تر است که مجدداً در این حالت افزایش شدت شعله در قسمت پایین و کاهش طول آن با فعال شدن پلاسما قابل مشاهده است. در این حالت به دلیل تشکیل مخلوط غلیظ رنگ شعله به سبب افزایش درصد مونو اکسید کربن نسبت به حالت رقیق و

افزایش می‌یابند. تحلیل نتایج این بخش بر اساس ساختاری شعله در هر مورد آورده شده است.

در جدول ۸ شعله پیش‌آمیخته محصور متان برای رینولدز ۴۰۰، قطر الکتروود داخلی ۴mm و نسبت توازن‌های ۰/۸، ۰/۹ و ۱/۰ برای مقادیر مختلف توان پلاسما آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است شعله بدون وجود پلاسما کاملاً جدا از الکتروود داخلی می‌باشد. در فرایند تست، تشکیل و حفظ این شعله به سختی مقدور بود و معمولاً به سرعت از تیوب خارج و یا خاموش می‌شد. به این ترتیب با شعله کاملاً ناپایدار مواجه هستیم. با اعمال پلاسما همان‌طور که مشخص است قسمت پایین شعله به واسطه میدان الکتریکی تشکیل شده کاملاً به الکتروود داخلی می‌چسبد و به این ترتیب پایداری شعله افزایش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش توان پلاسمای اعمال شده ساختار شعله متراکم‌تر شده و بیشتر به الکتروود داخلی نزدیک می‌شود و نقاط اتصال نیز افزایش می‌یابد. به این ترتیب پهنای شعله در قسمت پایین افزایش می‌یابد و ارتفاع شعله کم شده و شدت نور آن افزایش پیدا می‌کند. دلیل این امر وجود اثرات هیدرودینامیک پلاسما و اثرگذاری بر میدان جریان اطراف الکتروود است که سبب تشکیل ورتکس در نزدیکی الکتروود می‌شود و منجر به ساختار پایدار شعله می‌گردد. اثرات مذکور برای مخلوط رقیق بیشتر قابل مشاهده است و حرکت از شعله ناپایدار به پایداری شعله در این حالات ملموس‌تر است.

جدول (۸): مشعل پیش‌آمیخته محصور متان برای رینولدز ۴۰۰ و نسبت توازن‌های ۰/۸، ۰/۹ و ۱/۰



است که باتوجه به مدت زمان موردنیاز برای اختلاط مؤثر اجزاء، غالب گونه های فعال که ناپایداری بالایی دارند در واکنش های برگشت در مجاورت با سایر گونه های موجود و همچنین دیوار به اجزا سازنده اولیه تبدیل خواهند شد. به این ترتیب تنها گونه های دارای نیمه عمر بالا در محفظه باقی خواهند ماند. در میان گونه های پلاسمایی، مورد غالبی که شرایط ماندگاری در این حالت را دارد گونه اوزون می باشد. به این ترتیب تست حاضر تبدیل به بررسی تأثیر اوزون بر ساختار شعله متحرک می گردد. عملکرد رآکتور پلاسما به این ترتیب می باشد که یک لوله کوارتز به عنوان مجرای عبور جریان و همچنین به عنوان دی الکتریک در نظر گرفته می شود و اطراف آن ورقه مسی به عنوان یک قطب ولتاژ پیچیده شده است. همچنین از یک میله فلزی در میان لوله کوارتز به عنوان قطب دیگر ولتاژ استفاده شده است. به این ترتیب با اعمال ولتاژ AC با دامنه زیاد می توان پلاسمای نسبتاً یکنواخت در مجرای عبور جریان ایجاد کرد.

در این تحقیق جهت بررسی تأثیر پیش فعال سازی جریان ورودی به محفظه احتراق از یک وسیله سد دی الکتریک DBD استفاده شده است. مشخصات این وسیله عبارت از یک لوله کوارتز به طول ۲۰۰ mm و قطر داخلی ۲۰ mm و قطر خارجی ۲۳ mm که به عنوان دی الکتریک استفاده می شود. در این وسیله از یک لوله فولادی با طول ۲۰۰ mm و قطر ۱۷ mm که توسط دو فلنج پلی اتیلن هم مرکز با لوله کوارتز قرار می گیرد، به عنوان یک الکترود و از نوار مسی به ضخامت ۰/۲ mm که در اطراف لوله کوارتز پیچیده شده است به عنوان الکترود دوم استفاده شده است. در این وسیله از یک ترانس تقویت ولتاژ به عنوان منبع تغذیه استفاده شده است. مشخصات ترانس عبارت از فرکانس ۶۰ Hz، ولتاژ متناوب ۱۵ kV و توان مصرفی ۱۳۰ W می باشد. به منظور کنترل بیشتر بر فرایند تولید اوزون و افزایش راندمان کاری ابزار DBD هوا به صورت گازهای تشکیل دهنده آن یعنی نیتروژن و اکسیژن به صورت مجزا وارد محفظه احتراق می شود. همچنین تنها گاز اکسیژن از DBD گذرانده می شود و کنترل میزان اوزون بر اساس تغییر میزان اکسیژن عبوری از DBD پیش از ورود به محفظه صورت می گیرد. برای افزایش دقت تستها لازم است از کپسول های گاز با درصد خلوص بسیار بالا مثلاً ۹۹/۹۹۵ استفاده کرد.

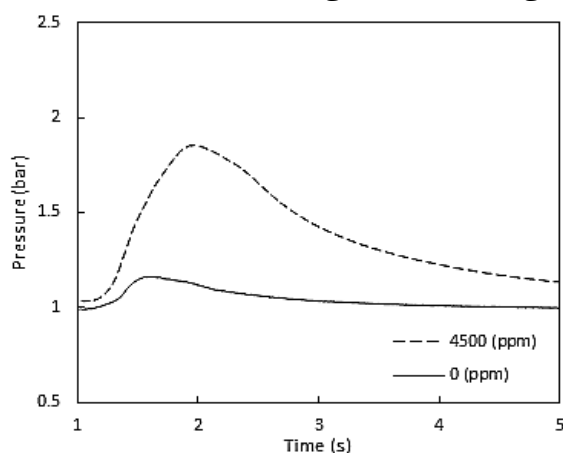
استوکیومتری مات تر می شود که در مراجع پیشین نیز به آن اشاره شده است

۲-۳- محفظه احتراق حجم ثابت

مشخصات هندسی محفظه احتراق حجم بسته به شرح زیر می باشد. یک محفظه احتراق استوانه ای از جنس استیل ضد زنگ با قطر داخلی ۲۷۰ mm، قطر خارجی ۳۰۰ mm و طول ۲۵۰ mm استفاده شده است. این محفظه دارای دو سوراخ روزه شده جهت تعبیه الکترودهای سیستم جرقه زنی در وسط سیلندر می باشد. این الکترودها که از جنس تنگستن و به قطر ۱/۵ mm ساخته شده اند به صورت شمع خودرو بسط یافته می باشند و پس از نصب در محل قابلیت تنظیم فاصله بین الکترودها از ۱ mm تا ۴ mm را دارا می باشند. همچنین با تنظیم ولتاژ ورودی به کوئل انرژی معادل بین ۸۰ mJ تا ۴۰۰ mJ در هر بار جرقه زدن قابل تولید است. دو فلنج موازی نیز برای نگه داشتن شیشه هایی از جنس کوارتز به قطر تقریبی ۷۰ mm و ضخامت ۱۵ mm به منظور ایجاد دسترسی اپتیکی تعبیه گردیده است. قطر قابل مشاهده این پنجره ۵۰ mm بوده و مابقی در داخل فنچ قرار گرفته است. یک دوربین سرعت بالا نیز مورد استفاده قرار گرفته است. مجموعه شلرین استفاده شده در این کار شامل یک لیزر، میکروسکوپ، فیلتر پلو رایزر برای تنظیم شدت نور، لنزهای کروی، یک روزنه با قطر ۰/۶ میلی متر و یک فیلتر اپتیکی برای محافظت از دوربین در برابر تشعشعات شعله بوده است. برای اندازه گیری فشار در حین اجرای تست نیز از یک فشارسنج دینامیکی با قابلیت اندازه گیری حداکثر ۱۰۰ psi با دقت ۰/۱ درصد محدوده اندازه گیری استفاده شده است. دلیل استفاده از این فشارسنج توجه به محدوده تست مورد نظر و کاهش خطای اندازه گیری می باشد.

بررسی تأثیرات پلاسما بر مشخصات احتراقی در محفظه حجم ثابت توسط اعمال پلاسما بر جریان های ورودی به محفظه صورت می گیرد. به این ترتیب که با اعمال پلاسما بر جریان ورودی مانند اکسیژن و واکنش های شیمیایی موردنیاز برای تولید اجزاء فعال مانند اوزون انجام می گیرند و بر اساس دبی عبوری، زمان ماند سیال در رآکتور پلاسما، میزان اختلاف پتانسیل و فرکانس اعمال ولتاژ و همچنین زمان مورد نظر برای اختلاط پیش از آغاز فرایند احتراق مقادیر متنوعی از گونه های فعال در سیال ایجاد می شود. شایان ذکر

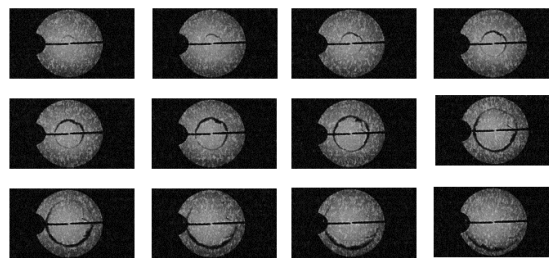
در شکل ۸ نتایج مربوط به منحنی فشار درون محفظه بر حسب زمان برای مخلوط سوخت متان و هوا با نسبت توازن ۰/۵۵ آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است برای حالت عدم وجود گاز اوزون اساساً احتراق شکل نمی‌گیرد. دلیل این امر رقیق بودن بیش از حد مخلوط جهت تشکیل و ادامه شعله متحرک می‌باشد. این نتیجه گیری در تطابق با تصاویر درون محفظه قرار دارد که گویای عدم شکل گیری شعله می‌باشد. با افزودن اوزون به مخلوط واکنش پذیری مخلوط افزایش پیدا می‌کند و افزایش فشار در محفظه پس از ایجاد شعله اولیه به معنای شکل گیری و ادامه شعله‌ای محدود می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت افزودن اوزون می‌تواند منجر به گسترش محدوده رقیق سوزی مخلوط به سمت نسبت توازن‌هایی شود که پیش از حضور گاز اوزون امکان اشتعال را نداشته‌اند. در این نسبت توازن اساساً پیشروی کروی شعله قابل مشاهده نیست و تنها شعله‌ای محدود در مرکز محفظه تشکیل می‌شود که پس از اندکی حرکت مضمحل می‌گردد.



شکل ۸): منحنی تغییرات فشار داخل محفظه بر حسب زمان برای سوخت متان با نسبت توازن ۰/۵۵ برای فشار اتمسفریک و دمای ۲۹۸K در شکل ۹ نتایج مربوط به منحنی فشار درون محفظه بر حسب زمان برای مخلوط سوخت متان و هوا با نسبت توازن ۰/۶ آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است برای حالت عدم وجود گاز اوزون منحنی تغییرات فشار بسیار تدریجی می‌باشد و این امر به معنای شکل گیری شعله غیریکنواخت می‌باشد. تصاویر شعله متحرک نیز گویای شکل گیری شعله نا متقارن و حرکت نیم کره شعله به سمت بالا می‌باشد که نشان دهنده عدم پیشروی کروی شعله در تمام محفظه است. با افزودن گاز اوزون به مخلوط روند افزایش فشار تشدید می‌شود و تصاویر نیز گویای پیشانی شعله

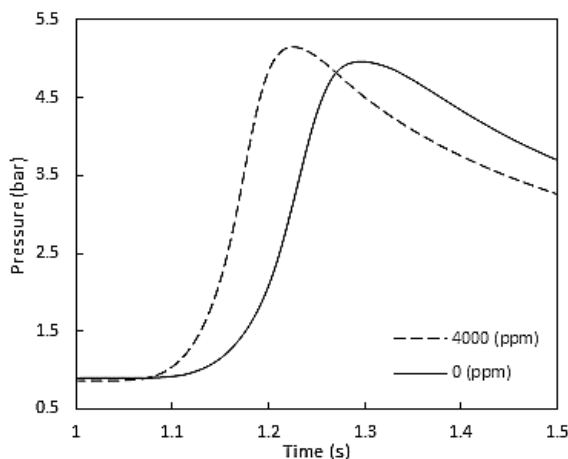
در مطالعه شعله متحرک از دوربین سونی مدل NEX-FS700UK AVCHD MTS با قابلیت تصویربرداری ۱۰۰۰fps، سنسور اندازه‌گیری فشار مطلق و بارومتریک مدل Testo 511 (0560 0511)، سنسور فشار فرکانس ۲۰kHz مدل Optrand autopsy-s، دیتالاگر مدل National Instruments SCB-100، پنل دیجیتال مدل Autonics MT4W-DA-4N، لیزر آرگون مدل Ion Laser Tech 5500A-00، ترانس نئون مدل JBKC-1520A، وسیله DBD، میز اپتیک و ادوات اپتیکی مدل Melles Griot، آنالیزور گاز اوزون مدل BMT 964 BT، پمپ خلأ تک استیج مدل Active VE115 3CFM، کمپرسور هوا و سیلندرهای گاز متان، اکسیژن و نیتروژن استفاده شده است.

نتایج مربوط به پیشروی آرام شعله متان با نسبت توازن ۰/۷ درون محفظه احتراق حجم ثابت در شرایط اتمسفریک و دمای اولیه ۲۹۸K در شکل ۷ آورده شده است. در این شکل رون تغییرات شعله در طول زمان با فواصل ۱ms آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است مطالب مذکور در مورد پیشروی کروی شعله به دلیل مواجهه با محیط ساکن پیش از وقوع اشتعال صحیح می‌باشد. به این ترتیب می‌توان از روش مذکور برای تعیین مشخصات شعله آرام استفاده کرد.

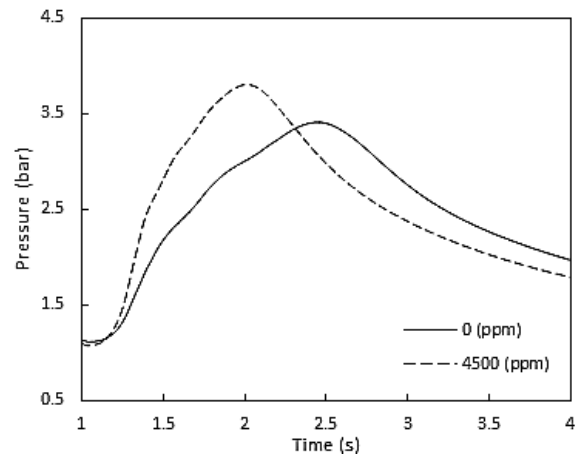


شکل ۷): تصاویر روند حرکت شعله آرام متان با نسبت توازن ۰/۷ و در شرایط اتمسفریک و دمای اولیه ۲۹۸K درون محفظه احتراق با فواصل زمانی ۱ms پس از ایجاد اشتعال اولیه در ادامه نتایج مربوط به منحنی تغییرات فشار درون محفظه حجم ثابت بر حسب زمان برای مخلوط‌های پیش آمیخته با نسبت توازن‌های مختلف و در شرایط فشار اتمسفریک و دمای اولیه ۲۹۸K و در دو حالت وجود و عدم وجود گاز اوزون در محفظه آورده شده است. در تست‌ها زمان جرقه زنی به میزان یک ثانیه پس از شروع ضبط تصاویر تنظیم شده است بنابراین در شکل‌ها خط زمان از مبدأ یک ثانیه آورده شده‌اند تا نتایج بهتر قابل تفسیر باشند.

شکل (۱۰): منحنی تغییرات فشار داخل محفظه بر حسب زمان برای سوخت متان با نسبت توازن ۰/۶۵ برای فشار اتمسفریک و دمای ۲۹۸K در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ به ترتیب نتایج مربوط به منحنی فشار درون محفظه بر حسب زمان برای مخلوط سوخت متان و هوا با نسبت توازن های ۰/۷ و ۰/۷۵ آورده شده است. این نسبت توازن ها مقداری متداول برای بکارگیری مخلوط سوخت و هوا در کاربردهای مختلف می باشد. همان طور که در این شکل ها مشخص است در حالت بدون اوزون منحنی تغییرات فشار درون محفظه کاملاً هموار است و تصاویر شعله بر پیشروی کروی آن صحنه می گذارد. افزایش گاز اوزون به این مخلوط ها سبب کاهش زمان توسعه اولیه شعله و رسیدن به بیشینه مقدار فشار می شود.



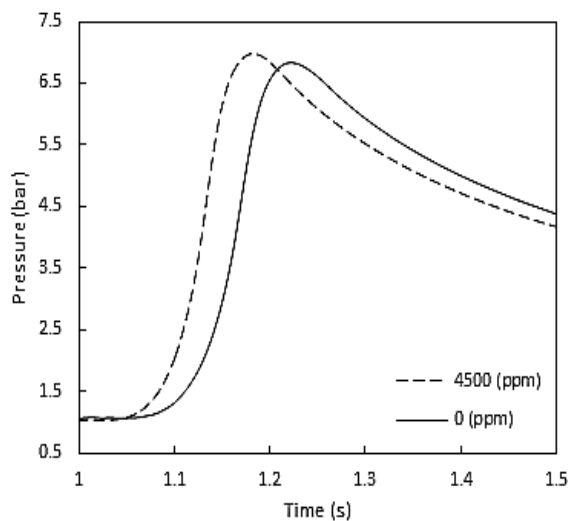
یکنواخت تر است هرچند همچنان با پیشروی کروی کامل فاصله دارد.



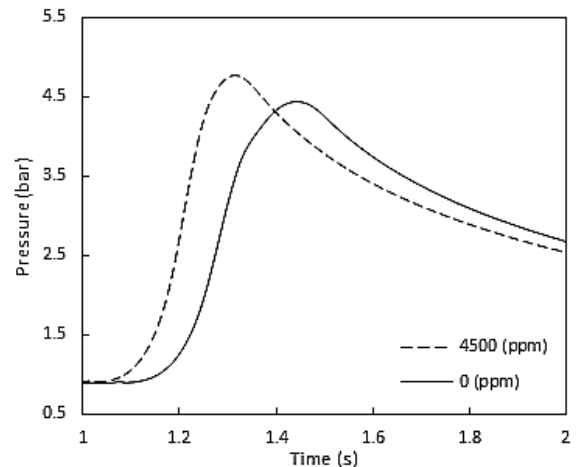
شکل (۹): منحنی تغییرات فشار داخل محفظه بر حسب زمان برای سوخت متان با نسبت توازن ۰/۶۵ برای فشار اتمسفریک و دمای ۲۹۸K

در شکل ۱۰ نتایج مربوط به منحنی فشار درون محفظه بر حسب زمان برای مخلوط سوخت متان و هوا با نسبت توازن ۰/۶۵ آورده شده است. همان طور که در این شکل مشخص است در مقایسه با نسبت توازن های کمتر در این حالت منحنی هموارتری وجود دارد که مطابق با تصاویر شعله بیانگر پیشروی شعله کروی از محل ایجاد شعله به سمت دیواره محفظه می باشد. البته با دور شدن از محل ایجاد شعله پیشانی شعله از شکل کروی خارج می شود که در منحنی فشار نیز برای نواحی نزدیک به بیشینه فشار قابل تشخیص می باشد. با افزودن گاز اوزون به این مخلوط مجدداً روند تغییرات فشار تشدید می شود و زمان توسعه اولیه شعله و رسیدن به بیشینه مقدار فشار نیز کاهش پیدا می کند. همچنین روند تغییر فشار در ناحیه فشار بیشینه نیز هموار شده است که گویای عدم تغییر شکل پیشانی شعله تا رسیدن به دیواره محفظه احتراق می باشد.

شکل (۱۱): منحنی تغییرات فشار داخل محفظه بر حسب زمان برای سوخت متان با نسبت توازن ۰/۷ برای فشار اتمسفریک و دمای ۲۹۸K



شکل (۱۲): منحنی تغییرات فشار داخل محفظه بر حسب زمان برای سوخت متان با نسبت توازن ۰/۷۵ برای فشار اتمسفریک و دمای ۲۹۸K تحلیلی کمی نتایج مربوط به مشاهدات تجربی تصاویر پیشروی شعله و منحنی تغییرات فشار درون محفظه بر



احتراقی و افزایش واکنش پذیری مخلوط به واسطه افزودن گاز اوزون به مخلوط می‌باشد. این امر در مورد افزایش بیشینه فشار درون محفظه احتراق با افزودن گاز اوزون نیز صادق است که برای نسبت توازن‌های دورتر از شرایط استوکیومتری این نتیجه بیشتر مشخص می‌باشد. به این ترتیب می‌توان دریافت افزودن گاز اوزون به مخلوط سبب اضافه شدن واکنش‌های جدید به مکانیزم احتراق می‌شود که سبب افزایش نرخ تولید رادیکال‌های اکسیژن و هیدروژن به‌عنوان عوامل اساسی در افزایش نرخ تولید حرارت، در احتراق می‌گردد.

۵- نتیجه‌گیری

استفاده از سیستم‌های پلاسمایی به‌عنوان راهکار نوین برای افزایش بازده و ایجاد قابلیت عملکرد سیستم‌های اشتعالی در شرایط کاری وسیع‌تر در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق تأثیرات سیستم‌های پلاسمایی بر مشخصه‌های عملکردی فرایند احتراق به‌صورت تجربی بررسی شده است. برای این منظور از دو چیدمان آزمایشگاهی استفاده شده است. در ساختار اول از مشعل بونزن به دو صورت باز و محصور برای مطالعه خواص شعله ساکن پیش آمیخته استفاده شده است. در این ساختار تحلیل نتایج بر اساس تصویربرداری اپتیکی به روش شیلرن و مشاهده پایداری و مخروط شعله تشکیل شده صورت گرفته است. در ساختار دوم از محفظه حجم ثابت برای مطالعه خواص شعله متحرک در محیط اشتعال پذیر استفاده شده است. در این مطالعه تفسیر نتایج بر اساس تصویربرداری فوق‌سریع به روش شیلرن از شعله شکل گرفته درون محفظه و همچنین داده‌های فشار درون محفظه حین احتراق استفاده شده است. نتایج گویای بهبود مشخصات شعله شامل سرعت آرام شعله و پایداری آن بر اساس مشاهدات شعله باز می‌باشد. همچنین کاهش زمان توسعه اولیه شعله و افزایش ناحیه اشتعال پذیری مخلوط تحت تأثیر محیط پلاسمایی، از نتایج حاصل از تست محفظه حجم بسته می‌باشد. نتایج به‌صورت خلاصه در شمارگان زیر آورده شده است. ۱- افزایش سرعت آرام شعله برای شعله پیش آمیخته باز تحت تأثیر پلاسما ۲- افزایش پایداری شعله برای شعله پیش آمیخته محصور تحت تأثیر پلاسما ۳- افزایش شدت اثرگذاری پلاسما بر مشخصات شعله با افزایش توان آن ۴- اثرگذاری

حسب زمان برای نسبت توازن‌های مختلف در جدول ۱۰ و جدول ۱۱ آورده شده است. همان‌طور که پیشتر توضیح داده شد شعله شکل گرفته برای نسبت توازن‌های ۰/۵۵ و ۰/۶ کامل نمی‌باشد و در این حالات پیشروی کروی شعله رخ نخواهد داد بنابراین نتایج کمی برای این حالات ارائه نشده است. در جدول ۱۰ نتایج مربوط به سرعت آرام شعله بر اساس روش‌های تحلیل پیشتر معرفی شده آورده شده است. همان‌طور که از مندرجات این جدول مشخص است افزایش گاز اوزون به مخلوط سبب افزایش سرعت آرام شعله می‌شود و این امر از کاهش زمان رسیدن به بیشینه فشار درون محفظه قابل تشخیص است. در جدول ۱۱ نتایج مربوط به زمان توسعه اولیه شعله بر اساس روش‌های پیشتر معرفی شده آورده شده است. همان‌طور که از مقادیر مندرج در این جدول مشخص است افزایش گاز اوزون به مخلوط سبب کاهش زمان شکل‌گیری شعله می‌شود. همچنین در مورد بیشینه فشار درون محفظه، همان‌طور که در شکل‌ها نمایش داده شده است، افزایش اوزون سبب افزایش فشار درون محفظه می‌گردد که دلیل این امر تکمیل فرایند سوزش مخلوط قابل اشتعال به واسطه افزودن گاز اوزون می‌باشد.

جدول (۱۰): تحلیل کمی نتایج مربوط به شعله متحرک متان درون محفظه حجم ثابت بر اساس میزان سرعت آرام شعله (cm/s)

Power (W)	0 (ppm)	4000 (ppm)	Improvement (%)
$\phi = 0.65$	16.2	20.2	24.7
$\phi = 0.7$	20.5	24.8	21
$\phi = 0.75$	24.1	28.9	19.8

جدول (۱۱): تحلیل کمی نتایج مربوط به شعله متحرک متان درون محفظه حجم ثابت بر اساس میزان زمان لازم برای توسعه اولیه شعله (ms)

Power (W)	0 (ppm)	4000 (ppm)	Improvement (%)
$\phi = 0.65$	236	163	31
$\phi = 0.7$	174	127	27.1
$\phi = 0.75$	119	89	25.3

از نتایج این جداول می‌توان دریافت که تأثیر افزایش گاز اوزون با افزایش نسبت توازن مخلوط به سمت مقادیر استوکیومتری کاهش می‌یابد. دلیل این امر بهبود روند احتراق پایه و افزایش واکنش‌پذیری مخلوط به سبب افزایش نسبت توازن مخلوط و کاهش پتانسیل بهبود مشخصات

- R.B., Ségur, P., and Mayoux, C. "Experimental and theoretical study of a glow discharge at atmospheric pressure controlled by dielectric barrier", *Journal of Applied Physics*, Vol. 83, pp. 2950-2957, 1998. Doi:10.1063/1.367051.
- [15] Massines, F., Segur, P., Gherardi, N., Khamphan, C., and Ricard, A. "Physics and chemistry in a glow dielectric barrier discharge at atmospheric pressure: diagnostics and modelling", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 174, pp. 8-14, 2003. Doi:10.1016/S0257-8972(03)00540-1.
- [16] Halter, F., Higelin, P., and Dagaut, P. "Experimental and detailed kinetic modeling study of the effect of ozone on the combustion of methane", *Energy & fuels*, Vol. 25, No. 7, pp. 2909-2916, 2011. Doi:10.1021/ef200550m.
- [17] Kee, R.J., Grcar, J.F., Smooke, M.D., Miller, J., and Meeks, E. "PREMIX: A Fortran program for modeling steady laminar one-dimensional premixed flames", Sandia National Laboratories Report, No. SAND85-8249, 1985.
- [18] Ombrello, T., Won, S.H., Ju, Y., and Williams, S. "Flame propagation enhancement by plasma excitation of oxygen. Part I: Effects of O₃", *Combustion and flame*, Vol. 157, No. 10, pp. 1906-1915, 2010. Doi:10.1016/j.combustflame.2010.02.005.
- [19] Ombrello, T., Won, S.H., Ju, Y., and Williams, S. "Flame propagation enhancement by plasma excitation of oxygen. Part II: Effects of O₂(a¹Δ_g)", *Combustion and Flame*, Vol. 157, No. 10, pp. 1916-1928, 2010. Doi:10.1016/j.combustflame.2010.02.004.
- [20] Do, H., Im, S.k., Cappelli, M.A., and Mungal, M.G. "Plasma assisted flame ignition of supersonic flows over a flat wall", *Combustion and Flame*, Vol. 157, No. 12, pp. 2298-2305, 2010. Doi:10.1016/j.combustflame.2010.07.006.
- [21] Ehn, A., Hurtig, T., Petersson, P., Zhu, J., Larsson, A., Fureby, C., Larfeldt, J., Li, Z., and Aldén, M. "Setup for microwave stimulation of a turbulent low-swirl flame", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 49, No. 18, p.185601, 2016. Doi:10.1088/0022-3727/49/18/185601.
- [22] Eliasson, B., and Kogelschatz, U. "Modeling and applications of silent discharge plasmas", *IEEE transactions on plasma science*, Vol. 19, pp. 309-323, 1991. Doi:10.1109/27.106829.
- [23] Golubovskii, Y.B., Maiorov, V., Behnke, J., and Behnke, J. "Modelling of the homogeneous barrier discharge in helium at atmospheric pressure", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 36, No. 39, 2002. Doi:10.1088/0022-3727/36/1/306.
- [24] Shin, J., and Raja, L.L. "Dynamics of pulse phenomena in helium dielectric-barrier atmospheric-pressure glow discharges", *Journal of Applied Physics*, Vol. 94, pp. 7408-7415, 2003. Doi:10.1063/1.1625414.
- [25] Nishida, H., and Abe, T. "Numerical analysis for plasma dynamics in SDBD plasma بیشتر پلاسما بر نسبت توازن های دورتر نسبت به مخلوط استوکیومتری ۵- اثرگذاری بیشتر پلاسما می فعال بر مشخصات شعله نسبت به پیش گرمایش مخلوط قابل اشتعال ۶- افزایش سرعت آرام شعله برای شعله متحرک در محفظه حجم بسته تحت تأثیر افزودن گاز اوزون ۷- کاهش زمان توسعه اولیه شعله برای شعله متحرک در محفظه حجم بسته تحت تأثیر افزودن گاز اوزون ۸- اثرگذاری بیشتر گاز اوزون بر نسبت توازن های دورتر نسبت به شرایط استوکیومتری
- ۶- مراجع
- [1] Fridman, A., and Kennedy, L.A. "Plasma physics and engineering", CRC press, 2021.
- [2] Ju, Y. "Recent progress and challenges in fundamental combustion research", *Advances in Mechanics*, Vol. 44, No. 20, p. 201402, 2014. Doi: 10.6052/1000-0992-14-011.
- [3] Fitzpatrick, R. "Plasma physics: an introduction", CRC Press, 2014.
- [4] Matveev, I.B., Ardelyan, N., Bychkov, V., Bychkov, D., and Kosmachevskii, K. "Plasma Assisted Combustion, Gasification and Pollution Control", Outskirts Press, Inc., 2013.
- [5] Starikovskiy, A., and Aleksandrov, N. "Plasma-assisted ignition and combustion, *Progress in Energy and Combustion Science*", Vol. 39, No. 1, pp. 61-110, 2013. Doi:10.1016/j.pecs.2012.05.003.
- [6] Raizer, Y. P. "Gas discharge physics", Springer, New York, 1991.
- [7] Fridman, A. "Plasma chemistry", Cambridge University Press, 2008.
- [8] Adamovich, I.V., and Lempert, W.R. "Challenges in understanding and predictive model development of plasma-assisted combustion", *Plasma Physics and Controlled Fusion*, Vol. 57, No. 1, p. 014001, 2014. Doi:10.1088/0741-3335/57/1/014001.
- [9] Ju, Y., and Sun, W. "Plasma assisted combustion: Progress, challenges, and opportunities", *Combustion and Flame*, Vol. 162, No. 3, pp. 529-532, 2015. Doi:10.1016/j.combustflame.2015.01.017.
- [10] Siemens, W. "Ueber die elektrostatische Induction und die Verzögerung des Stroms in Flaschendrahten", *Annalen der Physik*, Vol. 178, pp. 66-122, 1857. Doi:10.1002/andp.18571780905.
- [11] Warburg, E. "Über die Ozonisierung des Sauerstoffs durch stille elektrische Entladungen", *Annalen der Physik*, Vol. 318, pp. 464-476, 1904. Doi:10.1002/andp.18943180303.
- [12] Otto, M.P. "L'Ozone et ses applications", E. Chiron, 1929.
- [13] Buss, K. "Die elektrodenlose Entladung nach Messung mit dem Kathodenszillographen", *Archiv für Elektrotechnik*, Vol. 26, pp. 261-265, 1932. Doi:10.1007/BF01657192.
- [14] Massines, F., Rabehi, A., Decomps, P., Gadri,

- [37] Holman, J., "Experimental methods for engineers", 2001.
- [38] Sun, H., Yang, S.I., Jomaas, G., and Law, C.K. "High-pressure laminar flame speeds and kinetic modeling of carbon monoxide/hydrogen combustion", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 31, No. 1, pp. 439-446, 2007. Doi:10.1016/j.proci.2006.07.193.
- [26] Lin, K.M., Hung, C.T., Hwang, F.N., Smith, M.R., Yang, Y.W., and Wu, J.S. "Development of a parallel semi-implicit two-dimensional plasma fluid modeling code using finite-volume method", *Computer Physics Communications*, Vol. 183, pp. 1225-1236, 2012. Doi:10.1016/j.cpc.2012.02.001.
- [27] Seaton, A., Godden, D., MacNee, W., and Donaldson, K. "Particulate air pollution and acute health effects", *The lancet*, Vol. 345, pp. 176-178, 1995. Doi:10.1016/S0140-6736(95)90173-6.
- [28] Ehn, A., Zhu, J.J., Petersson, P., Li, Z.S., Aldén, M., Fureby, C., Hurtig, T., Zettervall, N., Larsson, A., and Larfeldt, J. "Plasma assisted combustion: Effects of O₃ on large scale turbulent combustion studied with laser diagnostics and Large Eddy Simulations", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 35, No. 3, pp.3487-3495, 2015. Doi:10.1016/j.proci.2014.05.092.
- [29] Weller, H.G., Tabor, G., Jasak, H., and Fureby, C. "A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques", *Computers in physics*, Vol. 12, No. 6, pp. 620-631, 1998. Doi:10.1063/1.168744.
- [30] Sabelnikov, V., and Fureby, C. "LES combustion modeling for high Re flames using a multi-phase analogy", *Combustion and Flame*, Vol. 160, No. 1, pp. 83-96, 2013. Doi:10.1016/j.combustflame.2012.09.008.
- [31] Fureby, C., Ehn, A., Nilsson, E., Petterson, P., Aldén, M., Hurtig, T., Zettervall, N., Li, Z., and Larfeldt, J. "Investigations of microwave stimulation of turbulent flames with implications to gas turbine combustors", In *55th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, p. 1779, 2017. <https://doi.org/10.2514/6.2017-1779>.
- [32] Nagaraja, S. "Multi-scale modeling of nanosecond plasma assisted combustion", PhD thesis, Georgia Institute of Technology, 2014.
- [33] Wang, C.C. "Numerical Simulation of Combustion Enhancement Through a Repetitive Pulsed Plasma Actuator", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2015. Doi:10.2514/1.T4579.
- [34] Settles, G.S. "Schlieren and shadowgraph techniques: visualizing phenomena in transparent media", Springer Science & Business Media, 2001.
- [35] Rallis, C.J., and Garforth, A.M. "The determination of laminar burning velocity", *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 6, No. 4, pp. 303-329, 1980. Doi:10.1016/0360-1285(80)90008-8.
- [36] Elattar, H. F., Specht, E., Fouda, A., and BinMahfouz, A.S. "Study of parameters influencing fluid flow and wall hot spots in rotary kilns using CFD", *Can. J. Chem. Eng.*, Vol. 94, No. 2, pp. 355-367, 2016. Doi:10.1002/cjce.22392.